



“十三五”普通高等教育本科规划教材
高等院校汽车专业“互联网+”创新规划教材

新能源汽车技术

（第3版）

崔胜民　编著




扫一扫联系客服


电子课件



说 明

本书电子版仅提供给高校任课教师使用，如有任课教师需要本书课件或其他相关教学资料，请联系北京大学出版社客服，微信手机同号：15600139606，扫下面二维码可直接联系。

由于教材版权所限，仅限任课教师索取，谢谢！



“十三五”普通高等教育本科规划教材
高等院校汽车专业“互联网+”创新规划教材

新能源汽车技术

（第3版）

崔胜民　编　著



内 容 简 介

本书全面系统地论述了新能源汽车技术，阐述了新能源汽车的类型,发展新能源汽车的必要性和新能源汽车的技术路线及关键技术；重点介绍了电动汽车用动力电池和电动汽车用电动机的类型、特点、工作原理及基本特性等，以及纯电动汽车、增程式电动汽车、混合动力汽车、燃料电池电动汽车的结构、原理及设计方法等。书中内容既有在新能源汽车上已经广泛应用的成熟技术，又有近年来发展的一些高新技术。

本书内容丰富，理论性和实用性强，可作为高等院校车辆工程及其相关专业的教材，也可作为从事新能源汽车相关领域的工程技术人员、管理人员和科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

新能源汽车技术/崔胜民编著 . —3 版 . —北京： 北京大学出版社，2020. 8
高等院校汽车专业“互联网+ ”创新规划教材
ISBN 978 - 7 - 301 - 31175 - 2

Ⅰ. ①新… Ⅱ. ①崔… Ⅲ. ①新能源—汽车—高等学校—教材 Ⅳ. ①U469. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 022661 号

书　　名 新能源汽车技术（第 3 版）
XINNENGYUAN QICHE JISHU（DI - SAN BAN）
著作责任者 崔胜民 编著
策 划 编 辑 童君鑫
责 任 编 辑 黄红珍
数 字 编 辑 蒙俞材
标 准 书 号 ISBN 978 - 7 - 301 - 31175 - 2
出 版 发 行 北京大学出版社
地　　址 北京市海淀区成府路 205 号 100871
网　　址 http://www. pup. cn 新浪微博：@ 北京大学出版社
电 子 信 箱 pup_6@ 163. com
电　　话 邮购部 010 - 62752015 发行部 010 - 62750672 编辑部 010 - 62750667
印 刷 者
经 销 者 新华书店
787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 17 印张 396 千字
2009 年 9 月第 1 版 2014 年 2 月第 2 版
2020 年 8 月第 3 版 2020 年 8 月第 1 次印刷
定　　价 49. 00 元

第 3 版前言

石油短缺、环境污染、气候变暖是全球汽车产业面临的共同挑战。新能源汽车已经成为汽车工业的发展趋势，一些国家已经提出了停售燃油汽车的时间表。我国是一个石油短缺的国家，又是一个石油消费大国，石油对外依存度逐年增加，已经超过70%。为此，国家多次出台政策，鼓励发展新能源汽车，2018年新能源汽车销量为125.6万辆，2019年新能源汽车销量为120.6万辆，新能源汽车长期向好的发展态势没有改变。

编者对《新能源汽车技术》(第2版)进行了全面修订，更新、增加了部分内容，删掉了一些陈旧的内容，使之更适合作为教材使用。书中链接了与新能源汽车相关的知识，读者可以利用移动设备扫描书中的二维码进行学习。

本书全面系统地论述了新能源汽车技术。全书共分7章。第1章阐述了新能源汽车的定义和分类，发展新能源汽车的必要性和新能源汽车的技术路线；第2章阐述了电池分类、电池的性能指标和电动汽车对动力电池的要求，对铅酸蓄电池、镍氢蓄电池、锂离子蓄电池、燃料电池、太阳电池和其他动力电池进行了详细介绍；第3章阐述了电动机的分类、电动机的主要性能指标和电动汽车对电动机的要求，对直流电动机、无刷直流电动机、异步电动机、永磁同步电动机、开关磁阻电动机和轮毂电动机进行了详细介绍；第4章阐述了纯电动汽车的分类、组成与原理、驱动系统的布置形式及纯电动汽车的特点和关键技术，对纯电动汽车的传动系统参数设计、动力性和经济性、电池管理系统和制动能量回收系统进行了详细介绍；第5章阐述了增程式电动汽车的结构、增程器的分类、增程式电动汽车的原理和特点，对增程式电动汽车的动力传动系统参数匹配、控制策略、动力系统建模与仿真进行了详细介绍；第6章阐述了混合动力汽车的分类、组成与原理、动力耦合类型、特点和关键技术，对混合动力汽车的动力系统设计、制动能量回收系统和能量管理进行了详细介绍；第7章阐述了燃料电池电动汽车的类型、特点、对燃料电池的基本要求、关键技术，对燃料电池电动汽车的基本结构、传动系统的参数设计和能量控制策略进行了详细介绍。

书中内容既有在新能源汽车上已经广泛应用的成熟技术，又有近年来发展的一些高新技术，全面反映了新能源汽车的先进技术。

由于编者水平有限，书中疏漏和不当之处在所难免，敬请读者给予指正。

编　者

2020年2月



【资源索引】

目　录

第 1 章　绪　　论

随着世界石油资源的短缺，以及燃油汽车对环境破坏的压力越来越大，发展新能源汽车是实现汽车工业可持续发展的必由之路。

1.1　新能源汽车的定义和分类

1.1.1　新能源汽车的定义

新能源汽车是指采用非常规的车用燃料作为动力来源（或使用常规的车用燃料、采用新型车载动力装置），综合汽车的动力控制和驱动方面的先进技术，形成的技术原理先进，具有新技术、新结构的汽车。

非常规的车用燃料指除汽油、柴油、天然气、液化石油气、乙醇汽油、甲醇、二甲醚之外的燃料。

1.1.2　新能源汽车的分类

新能源汽车包括纯电动汽车、增程式电动汽车、混合动力汽车、燃料电池电动汽车、氢发动机汽车及其他新能源汽车等。

1. 纯电动汽车

纯电动汽车（Blade Electric Vehicle，BEV）是一种采用单一蓄电池作为储能动力源的汽车。它将蓄电池作为储能动力源，通过蓄电池向电动机提供电能，驱动电动机运转，从而推动汽车行驶。



【比亚迪宋纯电动汽车】

2. 增程式电动汽车

增程式电动汽车（Extended Range Electric Vehicle，E-REV）是一种配有地面充电和车载供电功能的纯电驱动的电动汽车，其运行模式可以根据需要处于纯电动模式、增程模式或混合动力模式，是介于纯电动汽车和混合动力汽车之间的一种过渡车型，具有纯电动汽车和混合动力汽车的特征，有人把它划分为纯电动汽车范畴，也有人把它划分为混合动力汽车范畴，认为它是一种插电式串联混合动力汽车。



【商用增程式电动汽车】

3. 混合动力汽车

混合动力汽车（Hybrid Electric Vehicle，HEV）是指驱动系统由两个或多个能同时运转的单个驱动系统联合组成的汽车，汽车的行驶功率依据实际的行驶状态由单个驱动系统单独或多个驱动系统共同提供。因各个组成部件、布置方式和控制策略的不同，混合动力汽车有多种形式。



【大众插电式混合动力 SUV】

混合动力汽车一般分为常规混合动力汽车和插电式混合动力汽车，后面不做特殊说明的混合动力汽车主要是指常规混合动力汽车。

4. 燃料电池电动汽车



【上汽燃料电池 MPV】

燃料电池电动汽车(Fuel Cell Electric Vehicle，FCEV)是利用氢气和空气中的氧气在催化剂的作用下，在燃料电池中经电化学反应产生的电能作为主要动力源驱动的汽车。燃料电池电动汽车实质上是纯电动汽车的一种，与纯电动汽车的主要区别在于动力电池的工作原理不同。一般来说，燃料电池是通过电化学反应将化学能转化为电能，电化学反应所需的还原剂一般采用氢气，氧化剂则采用氧气，因此最早开发的燃料电池电动汽车多是直接采用氢燃料，而氢气的储存可采用液化氢、压缩氢气或金属氢化物储氢等形式。

5. 氢发动机汽车

氢发动机汽车是以氢发动机为动力源的汽车。一般发动机使用的燃料是柴油或汽油，氢发动机使用的燃料是气体氢。氢发动机汽车是一种真正实现零排放的交通工具，排放出的是纯净水。氢发动机汽车具有无污染、零排放、储量丰富等优势。

6. 其他新能源汽车

其他新能源汽车包括使用超级电容器、飞轮等高效储能器的汽车。

目前在我国，新能源汽车主要是指纯电动汽车、增程式电动汽车、插电式混合动力汽车和燃料电池电动汽车。常规混合动力汽车被划分为节能汽车。

1.2 发展新能源汽车的必要性

石油短缺、环境污染、气候变暖是全球汽车产业面对的共同挑战，各国政府及产业界纷纷提出各自的发展战略，积极应对，以保持其汽车产业的可持续发展，并提高未来的国际竞争力。新能源汽车已成为21世纪汽车工业发展的热点。

1.2.1 石油短缺

据英国石油公司(BP)发布的《BP世界能源统计年鉴(2019)》显示，截至2018年年底，全球探明石油储量达到1.7297万亿桶，按照2018年生产水平，已探明石油储量可供人类开采50年。

我国既是一个石油相对短缺的国家，又是一个石油消费大国，2019年石油消费量达到6.96亿吨，其中石油进口5.06亿吨，对外依存度高达72.7%。

目前世界汽车保有量突破10亿辆，预计到2030年全球汽车保有量将突破20亿辆，主要增量来自发展中国家，其中中国增速全球第一。我国汽车保有量增加迅速，截至2019年年底，汽车保有量达2.6亿辆，居世界第二位。

2018年我国汽车产销分别达2780.9万辆和2808.9万辆，2019年我国汽车产销分别达2572.1万辆和2576.9万辆，虽然同比有所下降，但连续11年蝉联全球第一，继续成为世界第一大汽车生产大国和第一新车销售市场。由此带来的能源安全问题将更加突出。

汽车消费的快速增长导致石油消耗加速增长。我国机动车燃油消耗量约占全国总油耗

的 1/3 以上，这也使得中国石油对外依存度每年都在不断攀升。

1.2.2 环境污染

燃油汽车在行驶过程中会产生大量的有害气体，不但污染环境，还大大地影响人类健康。汽车尾气主要污染物如图 1.1 所示。这些一次污染物还会通过大气化学反应生成光化学烟雾、酸沉降等二次污染物。据统计，全球大气污染 42%源于交通车辆产生的污染。随着城市机动车数量的快速增长，机动车排气污染已成为城市大气污染的主要贡献者。一些城市机动车排放的污染物对多项大气污染指标的贡献率已达到 70%以上。机动车排放污染已对城市大气污染构成了严重威胁。

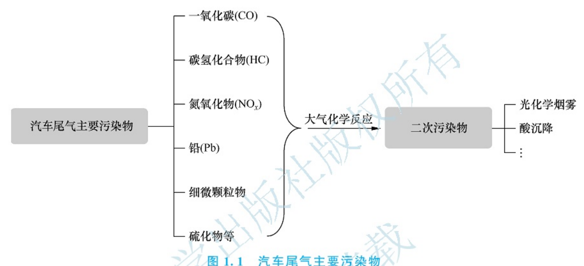


图 1.1　汽车尾气主要污染物

1.2.3 气候变暖

能源的大量消耗带来温室气体排放问题。二氧化碳是全球最重要的温室气体，是造成气候变化的主要原因，而它主要来自化石燃料的燃烧。

据科学家预测，未来 50～100 年人类将完全进入一个变暖的世界。由于人类活动的影响，温室气体和硫化物气溶胶的浓度增加过快，未来 100 年全球平均地表温度将上升 1.4～5.8℃，到 2050 年我国平均气温将上升 2.2℃。

越来越多的证据证明，人类活动是造成气候变暖的原因，而气候变暖又是由于大气中聚集了大量温室气体（主要是二氧化碳）。

气候变化风险加剧。交通领域二氧化碳排放成为关注重点。据国际能源署(International Energy Agency，IEA)估计，汽车二氧化碳总排放量将从 1990 年的 29 亿吨增加到 2020 年的 60 亿吨。汽车对地球环境造成了巨大影响。

在能源和环保的压力下，新能源汽车无疑成为未来汽车的发展方向。荷兰、挪威、法国、英国、印度等国家已推出了具体的禁售燃油汽车时间表。我国一些汽车企业也提出了禁售燃油汽车时间表。

1.3　节能与新能源汽车技术路线

2017 年，我国发布了《节能与新能源汽车技术路线图》。

1.3.1 总体发展目标

(1) 至2020年。乘用车新车平均油耗5.0L/100km,商用车新车油耗接近国际先进水平,新能源汽车销量占汽车总体销量的比例达到7%以上,驾驶辅助、部分自动驾驶车辆市场占有率达到50%。

(2) 至2025年。乘用车新车平均油耗4.0L/100km,商用车新车油耗达到国际先进水平,新能源汽车销量占汽车总体销量的比例达到20%以上,高度自动驾驶车辆市场占有率达到约15%。

(3) 至2030年。乘用车新车平均油耗3.2L/100km,商用车油耗同步国际先进水平,新能源汽车销量占汽车总体销量的比例达到40%以上,完全自动驾驶车辆市场占有率接近10%。

1.3.2 节能汽车技术路线

1. 总体思路

节能汽车方面总体思路是以混合动力为重点,以动力总成升级,先进电子电器为支撑,全面提升传统燃油车节能技术和燃油经济水平。

(1) 以混合动力技术为重点,以动力总成优化升级、降低摩擦和先进电子电气技术为支撑,全面提升传统燃油汽车节能技术和燃油经济性水平。

(2) 以结构节能和技术节能并重,加快紧凑型及以下小型车的推广,显著提高小型车的比例。

(3) 以发展天然气车辆为主要方向,因地制宜适度发展替代燃料汽车,推动我国汽车燃料的低碳化、多元化,降低对石油的依赖。

2. 发展目标

节能汽车发展目标见表1-1。

表1-1 节能汽车发展的目标

时间	乘用车新车平均油耗/(L/100km)	商用车平均油耗相比2015年降低/(%)	节能汽车市场占有率/(%)
2020年	5.0	10	30
2025年	4.0	15	40
2030年	3.2	30	50

3. 技术路径

(1) 节能乘用车:提高发动机热效率,优化动力总成匹配,降低传动损失,减少整车能量损耗,混合动力发动机专用化,提高混合动力系统效率。

(2) 节能商用车:提高柴油机热效率,降低整车能量损耗,采用混合动力。

4. 发展重点

(1) 先进内燃机燃烧机理研究。

(2) 自主控制系统开发。
(3) 全可变气门技术。
(4) 废气能量回收。
(5) 发动机热管理技术。
(6) 变速器自动化、高效化及核心零部件技术。
(7) 低摩擦技术研究。
(8) 增压器及应用技术。
(9) 先进燃油喷射系统研究。
(10) 48V 系统开发。
(11) 混合动力发动机技术。
(12) 混合动力机电耦合技术。

1.3.3 纯电动与插电式混合动力汽车技术路线

1. 总体思路

(1) 在应用领域上，以中型及以下车型规模化发展纯电动乘用车为主，实现纯电动技术在家庭用车、公务用车、租赁服务及短途商用车等领域的推广应用。

(2) 以紧凑型及以上车型规模化发展插电式混合动力乘用车为主，实现插电式混合动力技术在私人用车、公务用车及其他日均行驶里程较短的领域推广应用。

(3) 以动力电池、驱动电机突破发展支撑整车竞争力提升并实现关键部件批量出口。

(4) 以覆盖全国的充电设施与服务网络建设支撑电动汽车大规模推广。

2. 发展目标

纯电动与插电混合动力汽车发展目标见表1-2。

表1-2 纯电动与插电混合动力汽车发展目标

时间	纯电动乘用车续驶里程/km	公交客车单位载质量电耗水平/[kW·h/(100km·t)]	插电式混合动力汽车混动模式油耗
2020年	300	3.5	比2020年内燃机汽车降低25%
2025年	400	3.2	比2020年插电式混合动力汽车降低10%
2030年	500	3.0	比2025年插电式混合动力汽车降低20%

3. 技术路径

(1) 纯电动汽车：提高动力电池能量密度，提高电驱动系统效率，底盘电动专用化。

(2) 插电式混合动力汽车：优化混合动力系统构型，基于多信息的整车预测控制，动力系统集成设计。

(3) 充电基础设施：快速充电技术，互联互通技术，充电便利性。

4. 发展重点

(1) 低成本、高效率混合动力总成开发技术。
(2) 动力电机与底盘集成技术。
(3) 纯电动汽车动力系统集成及其控制技术。
(4) 高性能动力电机技术。
(5) 新型电机控制技术。
(6) 先进充电技术。
(7) 整车智能能量管理技术。
(8) 纯电动和插电式混合动力汽车控制技术。

1.3.4 燃料电池电动汽车技术路线

1. 总体思路

(1) 近期(5年内)以中等功率燃料电池与大容量动力电池的深度混合动力构型为技术特征，实现燃料电池电动汽车在特定地区的公共服务用车领域大规模示范应用。

(2) 中期(10年内)以大功率燃料电池与中等容量动力电池的电电混合为技术特征，实现燃料电池电动汽车的较大规模批量化商业应用。

(3) 远期(15年内)以全功率燃料电池为动力特征，在私人乘用车、大型商用车领域实现百万辆规模的商业推广；以可再生能源为主的氢能供应体系建设与规模扩大支撑燃料电池电动汽车规模化发展。

2. 发展目标

2020—2030年燃料电池电动汽车逐步由示范运行向大规模推广应用发展，具体发展目标见表1-3。

表1-3 燃料电池电动汽车发展目标

时间	燃料电池电动汽车发展规模/万辆	燃料电池堆比功率/(kW/kg)	燃料电池堆耐久性/h
2020年	0.5	2	5000
2025年	5	2.5	6000
2030年	100	2.5	8000

3. 技术路径

(1) 燃料电池关键材料技术。
(2) 电堆技术。
(3) 系统集成与控制技术。
(4) 动力系统开发技术。
(5) 燃料电池汽车的设计与集成技术。

(6) 提高功率密度。
(7) 提高耐久性。
(8) 降低成本。
(9) 提高载氢安全。

4. 发展重点

(1) 新型燃料电池核心技术。
(2) 先进燃料电池电堆。
(3) 关键辅助系统零部件技术。
(4) 高性能燃料电池系统。
(5) 混合型燃料电池动力系统。
(6) 制氢、运氢、储氢及加氢基础设施。



1. 什么是新能源汽车？新能源汽车包括哪些类型？
2. 为什么要发展新能源汽车？
3. 我国节能与新能源汽车技术路线是什么？

第 2 章　电动汽车用动力电池

电池是电动汽车的动力源，是能量的储存装置，也是目前制约电动汽车发展的关键因素。要使电动汽车能与燃油汽车相竞争，关键是开发出比能量高、比功率大、使用寿命长、成本低的电池。

2.1　概　　述

2.1.1　电池分类

电池可以分为化学电池、物理电池和生物电池三大类。

1. 化学电池

化学电池利用物质的化学反应发电。

化学电池按工作性质分为原电池、蓄电池、燃料电池和储备电池。

(1) **原电池**

原电池又称一次电池，是指电池放电后不能用简单的充电方法使活性物质复原而继续使用的电池，如锌锰电池、锂锰电池、锌空气电池等。

(2) **蓄电池**

蓄电池又称二次电池，是指电池在放电后可通过充电的方法使活性物质复原而继续使用的电池，其充放电可以达数十次到上千次循环，如铅酸蓄电池、镍镉蓄电池、镍氢蓄电池、锂离子蓄电池等。

(3) **燃料电池**

燃料电池又称连续电池，是指参加反应的活性物质从电池外部连续不断地输入电池，电池就连续不断地工作而提供电能，如质子交换膜燃料电池、碱性燃料电池、磷酸燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池、固体氧化物燃料电池、直接甲醇燃料电池、再生型燃料电池等。

(4) **储备电池**

储备电池是指电池正负极与电解质在储存期间不直接接触，使用前注入电解液或者使用其他方法使电解液与正负极接触，此后电池进入待放电状态，如镁电池、热电池等。

化学电池还可根据电解质、电池特性等进行分类，如图 2.1 所示。

2. 物理电池

物理电池是利用光、热、物理吸附等物理能量发电的电池，如太阳电池、超级电容器、飞轮电池等。

3. 生物电池

生物电池是利用生物化学反应发电的电池，如微生物电池、酶电池、生物太阳电池等。

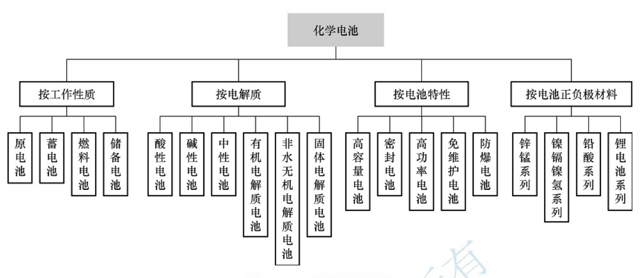


图 2.1　化学电池的分类

迄今已经实用化的车用蓄电池有传统的铅酸蓄电池、镍镉蓄电池、镍氢蓄电池和锂离子蓄电池。在物理电池领域，超级电容器也应用于纯电动汽车和混合动力汽车。生物燃料电池在车用动力中应用前景也十分广阔，以氢为燃料的燃料电池和氧化物燃料电池的研发已进入重要发展阶段。

2.1.2 电池的性能指标

电池作为电动汽车的储能动力源，在电动汽车上发挥着非常重要的作用。要评定电池的实际效应，主要是看电池的性能指标。电池的性能指标主要有电压、容量、内阻、能量、功率、输出效率、自放电率、放电倍率、使用寿命等，根据电池种类，其性能指标有所差异。

1. 电压

电压分为端电压、开路电压、额定电压、放电电压、充电终止电压和放电终止电压等。

（1）端电压

电池的**端电压**是指电池正极与负极之间的电位差。

（2）开路电压

电池在开路状态下的端电压称为**开路电压**，即电池在没有负载情况下的端电压。

（3）额定电压

额定电压是指电池在标准规定条件下工作时应达到的电压，镍镉蓄电池和镍氢蓄电池的额定电压为1.2V，锂离子蓄电池的额定电压为3.6V。

（4）放电电压

电池的**放电电压**是指电池接通负载后在放电过程中显示的电压，是工作电压。在电池放电初始的工作电压称为初始电压。

（5）充电终止电压

电池充足电时，极板上的活性物质已达到饱和状态，再继续充电，电池的电压也不会上升，此时的电压称为**充电终止电压**。镍镉蓄电池的充电终止电压为1.75～1.8V，镍氢

蓄电池的充电终止电压为1.5V，锂离子蓄电池的充电终止电压为4.25V。

(6) 放电终止电压

放电终止电压是指电池在一定标准所规定的放电条件下放电时，电池的电压将逐渐降低，当电池再不宜继续放电时电池的最低工作电压。如果电池的电压低于放电终止电压后电池继续放电，电池两端电压会迅速下降，形成深度放电。这样，极板上形成的生成物在正常充电时就不易恢复，从而影响电池的寿命。放电终止电压和放电率有关，放电电流直接影响放电终止电压。在规定的放电终止电压下，放电电流越大，电池的容量越小。镍镉蓄电池的放电终止电压一般在1.0～1.1V，镍氢蓄电池的放电终止电压一般规定为1V，锂离子蓄电池的放电终止电压为3.0V。

2. 容量

电池在一定的放电条件下所能放出的电量称为电池的容量，常用单位为A·h，电池的容量可以分为理论容量、实际容量、标称容量和额定容量等。

(1) 理论容量

理论容量把活性物质的质量按法拉第电磁感应定律计算而得到的最高理论值。为了比较不同系列的电池，常用比容量的概念，即单位体积或单位质量电池所能给出的理论电量，单位为A·h/L或A·h/kg。

(2) 实际容量

实际容量是指电池在一定条件下所能输出的电量，等于放电电流与放电时间的乘积，其值小于理论容量。

实际容量反映了电池实际存储电量的大小，电池容量越大，电动汽车的续驶里程就越长。在使用过程中，电池的实际容量会逐步衰减。国家标准规定：新出厂的电池实际容量大于额定容量值为合格电池。

(3) 标称容量

标称容量用来鉴别电池的近似安时值。

(4) 额定容量

额定容量也称保证容量，是按国家或有关部门颁布的标准，保证电流在一定的放电条件下应该放出的最低限度的容量，用C表示。

按照国际电工委员会标准和国家标准，镍镉蓄电池和镍氢蓄电池在20°C±5°C条件下，以0.1C充电16h后以0.2C放电至1.0V时所放出的电量为电池的额定容量；锂离子蓄电池在常温、恒流(1C)、恒压(4.2V)条件下充电3h后再以0.2C放电至2.75V时所放出的电量为电池的额定容量。

(5) 荷电状态

荷电状态(State of Charge，SOC)是电池在一定放电倍率下，剩余电量与相同条件下额定容量的比值。荷电状态反映电池容量的变化。SOC＝1表示电池充满电状态。随着电池的放电，电池的电荷数逐渐减少，此时可以用SOC的百分数的相对量来表示电池中电荷的变化状态。一般电池放电高效率区为(50％～80％)SOC。

3. 内阻

电池的内阻是指电流流过电池内部时所受到的阻力。电池内阻越大，电池自身消耗掉的能量越多，电池的使用效率越低。内阻很大的电池在充电时发热厉害，使电池的温度急

剧上升，对电池和充电器的影响很大。随着电池使用次数的增多，由于电解液的消耗及电池内部化学物质活性的降低，电池的内阻会有不同程度的升高。

4. 能量

电池的能量是指在一定放电制度下，电池所能输出的电能，单位是 W·h 或 kW·h。它影响电动汽车的续驶里程。

(1) 理论能量

理论能量是电池的理论容量与额定电压的乘积，指一定标准所规定的放电条件下，电池所输出的能量。

(2) 实际能量

实际能量是电池实际容量与平均工作电压的乘积，表示在一定条件下电池所能输出的能量。

(3) 比能量

比能量也称质量比能量，是指电池单位质量所能输出的电能，单位是 W·h/kg。常用比能量来比较不同的电池系统。

比能量有理论比能量和实际比能量之分。理论比能量是指 1kg 电池反应物质完全放电时理论上所能输出的能量，实际比能量是指 1kg 电池反应物质实际所能输出的能量。由于各种因素的影响，电池的实际比能量远小于理论比能量。

电池的比能量是综合性指标。它反映了电池的质量水平。电池的比能量影响电动汽车的整车质量和续驶里程，是评价电动汽车的动力电池是否满足预定的续驶里程的重要指标。

(4) 能量密度

能量密度也称体积比能量，是指电池单位体积所能输出的电能，单位是 W·h/L。

5. 功率

电池的功率是指电池在一定放电制度下，单位时间所输出能量的大小，单位为 W 或 kW。电池的功率决定了电动汽车的加速性能和爬坡能力。

(1) 比功率

单位质量电池所能输出的功率称为比功率，也称质量**比功率**，单位为 W/kg 或 kW/kg。

(2) 功率密度

单位体积电池所能输出的功率称为**功率密度**，也称体积比功率，单位为 W/L 或 kW/L。

6. 输出效率

动力电池作为能量储存器，充电时把电能转化为化学能储存起来，放电时把电能释放出来。在这个可逆的电化学转换过程中，有一定的能量损耗。通常用电池的容量效率和能量效率来表示。

(1) 容量效率

容量效率是指电池放电时输出的容量与充电时输入的容量之比，即

$$\eta_c = \frac{C_{放}}{C_{充}} \times 100\% \tag{2-1}$$

式中，η_c 为电池的容量效率；$C_{放}$ 为电池放电时输出的容量；$C_{充}$ 为电池充电时输入的容量。

影响电池容量效率的主要因素是副反应。当电池充电时，有一部分电量消耗在水的分解上。此外，自放电、电极活性物质的脱落、结块、孔率收缩等也降低容量输出。

(2) 能量效率

能量效率也称电能效率，是指电池放电时输出的能量与充电时输入的能量之比，即

$$\eta_w=\frac{W_{放}}{W_{充}}\times 100\% \tag{2-2}$$

式中，η_w 为电池的能量效率；$W_{放}$ 为电池放电时输出的能量；$W_{充}$ 为电池充电时输入的能量。

影响能量效率的因素是电池的内阻。内阻使电池充电电压增加，放电电压下降。内阻的能量损耗以电池发热的形式损耗掉。

7. 自放电率

自放电率是指电池在存放期间容量的下降率，即电池无负荷时自身放电使容量损失的速度。自放电率用单位时间容量降低的百分数表示，其表达式为

$$自放电率=\frac{C_a-C_b}{C_a\times T}\times 100\% \tag{2-3}$$

式中，C_a 为电池储存前的容量(A·h)；C_b 为电池储存后的容量(A·h)；T 为电池储存的时间，常用日、月计算。

8. 放电倍率

电池放电电流的大小常用“放电倍率”表示，即电池的放电倍率用放电时间表示或者以一定的放电电流放完额定容量所需的小时数来表示。由此可见，放电时间越短，放电倍率越高，则放电电流越大。

放电倍率等于额定容量与放电电流之比。根据放电倍率的大小，可将放电倍率分为低倍率($<0.5C$)、中倍率[$(0.5\sim3.5)C$]、高倍率[$(3.5\sim7.0)C$]、超高倍率($>7.0C$)。

例如，某电池的额定容量为20A·h，若用4A电流放电，则放完20A·h的额定容量需用5h，也就是说以5倍率放电，用符号$C/5$或$0.2C$表示，为低倍率。

9. 使用寿命

使用寿命是指电池在规定条件下的有效寿命期限。电池发生内部短路或损坏而不能使用，以及容量达不到规范要求时电池使用失效，这时电池的使用寿命终止。

电池的使用寿命包括使用期限和使用周期。使用期限是指电池可供使用的时间，包括电池的存放时间。使用周期是指电池可供重复使用的次数。

除此之外，成本也是一个重要的指标。电动汽车发展的瓶颈之一就是电池价格高。

2.1.3 电动汽车对动力电池的要求

电动汽车对动力电池的要求主要如下。

(1) 比能量高。为了提高电动汽车的续驶里程，要求电动汽车上的动力电池尽可能储存多的能量，但电动汽车又不能太重，其安装电池的空间也有限，这就要求电池具有大的比能量。

（2）比功率大。为了能使电动汽车在加速行驶、爬坡能力和负载行驶等方面能与燃油汽车相竞争，要求电池具有大的比功率。

（3）循环寿命长。循环寿命越长，则电池在正常使用周期内支撑电动汽车行驶的里程就越长，有助于降低车辆使用期内的运行成本。

（4）均匀一致性好。对于电动汽车而言，电池组的工作电压大多均应达到数百伏，这就要求至少有几十到上百只电池串联。为达到设计容量要求，有时甚至需要更多的单体并联。由于电池组的使用性能会受到性能最差的某些单体电池的制约，因此设计上要求各电池单体在容量、内阻、功率特性和循环特性等方面具有高度的均匀一致性。

（5）高低温性能好、环境适应性强。电动汽车作为一种交通工具，要求电池既要在北方冬天极冷的气温下工作，又要在南方夏天炎热环境中长期稳定地工作。在最恶劣的气候条件下，电池的工作温度可能要从－40℃变到60℃，甚至80℃。因此，要求电池应当具有良好的高低温特性及较强的环境适应性。

（6）安全性好。电池应能有效避免因泄漏、短路、撞击、颠簸等引起的起火或爆炸等危险事故发生，确保汽车在正常行驶或非正常行驶过程中的安全。

（7）价格低廉。价格低廉即材料来源丰富，电池制造成本低，以降低整车价格，提高电动汽车的市场竞争力。

（8）绿色、环保。制作电池的材料应与环境友好、无二次污染，并可再生利用。

2.1.4 电动汽车动力电池技术路线

1. 发展目标

为了支撑新能源汽车的发展，需要持续提升电池单体能量密度和降低单体成本，具体见表2－1。

表2－1 电动汽车动力电池发展目标

时间	纯电动汽车用动力电池的单体能量密度/(W·h/kg)	混合动力电动汽车用动力电池的单体能量密度/(W·h/kg)	纯电动汽车用动力电池系统成本/(元/瓦时)	混合动力电动汽车用动力电池系统成本/(元/瓦时)
2020年	350	200	1	1.5
2025年	400	250	0.9	1.3
2030年	500	300	0.8	1.1

2. 技术路径

（1）加大新体系电池的研发。

（2）提升关键材料及关键装备水平。

（3）提高电池的安全性、使用寿命和一致性。

（4）加速动力电池标准体系建设和电池回收再利用技术研究。



【Halo无线充电系统】

3. 发展重点

（1）动力电池新材料、新体系。

(2) 动力电池安全性及长寿命技术。
(3) 动力电池设计及仿真技术。
(4) 动力电池及其关键材料产业化技术。
(5) 动力电池系统及控制技术。
(6) 动力电池测试分析技术及标准体系。
(7) 动力电池梯级利用及资源回收技术。

2.2 铅酸蓄电池

铅酸蓄电池的应用历史最长，也是技术最成熟、价格最低廉的蓄电池。它已实现大批量生产，但比能量低，所占的质量和体积太大，而且一次充电行驶里程较短，自放电率高，循环寿命低，不适合现代电动汽车发展的需要，目前主要用在低速电动车上。

2.2.1 铅酸蓄电池的分类与结构

1. 铅酸蓄电池的分类

铅酸蓄电池分为免维护铅酸蓄电池和阀控密封式铅酸蓄电池。

(1) 免维护铅酸蓄电池

免维护铅酸蓄电池由于自身结构上的优势，电解液的消耗量非常小，在使用寿命内基本不需要补充蒸馏水。它具有耐振、耐高温、体积小、自放电小的特点，使用寿命一般为普通铅酸蓄电池的两倍。市场上的免维护铅酸蓄电池有两种：一种是在购买时一次性加电解液以后使用中不需要添加补充液；另一种是电池本身出厂时就已经加好电解液并封死，用户根本就不能加补充液。

(2) 阀控密封式铅酸蓄电池

阀控密封式铅酸蓄电池在使用期间不用加酸加水维护。由于电池为密封结构，不会漏酸，也不会排酸雾。电池盖子上设有溢气阀(也称安全阀)。该阀的作用是当电池内部气体量超过一定值，即电池内部气压升高到一定值时，溢气阀自动打开，排出气体，然后自动关闭，防止空气进入电池内部。

阀控密封式铅酸蓄电池分为玻璃纤维电池和胶体电池两种。玻璃纤维电池采用吸附式玻璃纤维棉作隔膜，电解液吸附在极板和隔膜中，电池内无流动的电解液，电池可以立放工作，也可以卧放工作；胶体电池的胶体以二氧化硅作凝固剂，电解液吸附在极板和胶体内，电池一般立放工作。如无特殊说明，阀控密封式铅酸蓄电池皆指玻璃纤维电池。

电动汽车使用的动力电池一般是阀控密封式铅酸蓄电池。

2. 铅酸蓄电池的结构

铅酸蓄电池的基本结构如图2.2所示。它由正负极板、隔板、电解液、溢气阀、壳体等部分组成。极板是铅酸蓄电池的核心部件，正极板上的活性物质是二氧化铅，负极板上的活性物质为海绵状纯铅。隔板隔离正、负极板，防止短路；作为电解液的载体，能够吸收大量的电解液，起到促进离子良好扩散的作用；还是正极板产生的氧气到达负极板的

“通道”，以顺利建立氧循环，减少水的损失。电解液由蒸馏水和纯硫酸按一定比例配制而成，主要作用是参与电化学反应，是铅酸蓄电池的活性物质之一。电池槽中装入一定密度的电解液后，由于电化学反应，正、负极板间会产生约为2.1V的电动势。溢气阀位于电池顶部，起到安全、密封、防爆等作用。

图2.2 铅酸蓄电池的基本结构

2.2.2 铅酸蓄电池的特点

1. 铅酸蓄电池的优点

铅酸蓄电池具有以下优点。

(1) 除锂离子蓄电池外，在常用蓄电池中，铅酸蓄电池的电压最高，为2.0V。

(2) 价格低廉。

(3) 可制成小至一安时大至几千安时的各种尺寸和结构的蓄电池。

(4) 高倍率放电性能良好，可用于发动机起动。

(5) 高低温性能良好，可在−40～60℃条件下工作。

(6) 电能效率高达60%。

(7) 易于浮充使用。

(8) 易于识别荷电状态。

2. 铅酸蓄电池的缺点

铅酸蓄电池具有以下缺点。

(1) 比能量低，在电动汽车中所占的质量和体积较大，一次充电行驶里程短。

(2) 使用寿命短，使用成本高。

(3) 充电时间长。

(4) 铅是重金属，存在污染。

2.2.3 铅酸蓄电池的工作原理

铅酸蓄电池在使用时，化学能转化为电能的过程称作放电。在使用后，借助于直流电在电池内进行化学反应，把电能转化为化学能而储蓄起来，这种蓄电过程称作充电。铅酸蓄电池是酸性蓄电池，其化学反应式为

$$PbO + H_2SO_4 \longrightarrow PbSO_4\downarrow + H_2O$$

充电时，把铅板分别和直流电源的正、负极相连，进行充电电解，阴极的还原反应为

$$PbSO_4 + 2e^- \longrightarrow Pb + SO_4^{2-}$$

阳极的氧化反应为

$$PbSO_4 + 2H_2O \longrightarrow PbO_2 + 4H^+ + SO_4^{2-} + 2e^-$$

充电时的总反应为

$$2PbSO_4 + 2H_2O \longrightarrow Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4$$

随着电流的通过，$PbSO_4$在阴极上变成蓬松的金属铅，在阳极上变成黑褐色的二氧化铅，溶液中有H_2SO_4生成。

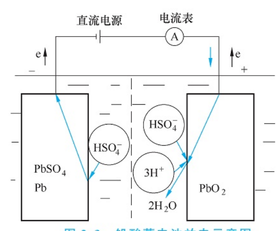


图 2.3 铅酸蓄电池放电示意图

放电(图 2.3)时蓄电池负极的氧化反应为

$$Pb \longrightarrow Pb^{2+} + 2e^-$$

由于硫酸的存在，Pb^{2+} 立即生成难溶解的 $PbSO_4$。

正极的还原反应为

$$PbO_2 + 4H^+ + 2e^- \longrightarrow Pb^{2+} + 2H_2O$$

同样，由于硫酸的存在，Pb^{2+} 也立即生成 $PbSO_4$。

放电时总的反应为

$$Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \longrightarrow 2PbSO_4 \downarrow + 2H_2O$$

蓄电池充电时，随着电池端电压的升高，水开始被电解，当电池电压每单体达到约 2.39V 时，水的电解不可忽视。水电解时阳极和阴极的化学反应式分别为

$$H_2O \longrightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^-$$

$$2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2$$

阳极给出电子，阴极得到电子，从而形成了回路电流。端电压越高，水的电解越激烈，此时充入的大部分电荷参加水电解，形成的活性物质很少。

说明：阳极、阴极与正极、负极的使用没有国家统一标准，一般充电时使用阳极、阴极，放电时使用正极、负极。

2.2.4 铅酸蓄电池的充放电特性

1. 铅酸蓄电池的放电特性

在铅酸蓄电池不放电的情况下，蓄电池中的活性物质微孔中的电解液的浓度与极板外的电解液浓度相同。铅酸蓄电池开始放电，活性物质表面的电解液浓度立即降低；而极板外的电解液是缓慢地向活性物质表面扩散，不能立即补偿活性物质表面电解液的浓度。随着放电过程的进行，活性物质表面的电解液浓度继续降低，结果导致蓄电池的端电压下降，如图 2.4 中 AB 段所示。

蓄电池继续放电，在活性物质表面的电解液浓度降低的同时，极板外的电解液向活性物质表面扩散，补偿了活性物质表面的电解液并保持了一定的浓度，活性物质表面的电解液的浓度变化缓慢，使蓄电池的端电压也随即保持稳定，如图 2.4 中 BC 段所示。

蓄电池继续放电，极板外的电解液的整体浓度逐渐降低，在活性物质表面的电解液的浓度也随之降低。又由于电解液和活性物质被消耗，其作用面积不断地减小，导致蓄电池的端电压也随着下降，如图 2.4 中 CD 段所示。

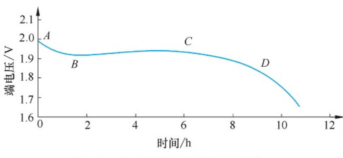


图 2.4 铅酸蓄电池的放电曲线

在放电末尾阶段，正、负电极上的活性物质逐渐转化为 $PbSO_4$。$PbSO_4$ 的生成使活性物质孔隙率降低，使活

性物质与 H_2SO_4 的接触更加困难，并且由于 $PbSO_4$ 使不良导体蓄电池的内阻增加，当蓄电池的端电压达到图 2.4 中的 *D* 点后，蓄电池的端电压急剧下降，达到所规定的终止电压。

蓄电池的放电与放电电流有密切关系，大电流放电时，蓄电池的电压下降明显，平缓部分缩短，曲线的斜率很大，放电时间缩短；随着放电电流的减小，蓄电池的电压下降趋缓，曲线也较平缓，放电时间延长。这种放电特性对蓄电池的正确使用有重要的意义。

2. 铅酸蓄电池的充电特性

在铅酸蓄电池充电开始后，活性物质表面的 $PbSO_4$ 转化为 Pb，并在活性物质表面附近生成 H_2SO_4，蓄电池的端电压迅速地上升，如图 2.5 中 *AB* 段所示。当达到 *B* 点以后，活性物质表面和微孔内的 H_2SO_4 浓度平缓地提高，蓄电池的端电压上升也比较缓慢，如图 2.5 中 *BC* 段所示。随着充电过程继续进行，达到充电量 90%左右，反应的极化增加，蓄电池的端电压明显地再次上升，如图 2.5 中 *CD* 段所示。当蓄电池的端电压达到 *D* 点时，蓄电池的两极开始大量析出气体。蓄电池的端电压超过 *D* 点后，电解过程使蓄电池的端电压又达到一个新的稳定值。

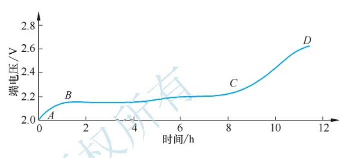


图 2.5 铅酸蓄电池的充电曲线

蓄电池充电还受到充电电流条件的影响，充电电流越大，活性物质的反应越快，反应生成 H_2SO_4 的速度越快，则浓度提高越快，蓄电池的端电压上升越快。一般来说用较大的电流充电时，虽然可以加快充电过程，但能量的损失也大，在充电终期大部分的电能用于产生热量和分解水。而且，用较大的电流充电时在电极上的电流的分布越加不均匀，电流分布多的部分活性物质的反应快，电流分布少的部分活性物质不能充分转化。所以，在蓄电池充电的后期应减小充电电流。

另外，蓄电池充电时蓄电池端电压的变化是随充电时电流强度的变化而变化的，即电流强度大，蓄电池的端电压高，电流强度小，蓄电池的端电压低。

2.2.5 铅酸蓄电池的充电方法

铅酸蓄电池的充电方法可以分为常规充电方法和快速充电方法两种。

1. 常规充电方法

铅酸蓄电池的常规充电方法主要有恒流充电法、分段电流充电法、恒压充电法、恒压限流充电法等。

(1) **恒流充电法**

恒流充电法是通过调整充电装置输出电压或改变与蓄电池串联电阻的方式使充电电流强度保持不变的充电方法。

恒流充电法控制简单，但由于蓄电池的可接受电流能力是随着充电过程的进行而逐渐下降的，到充电后期，充电电流多用于电解水，产生气体，使析气过甚，此时电能不能有效转化为化学能，多变为热能消耗掉了。因此，常选用阶段充电法。恒流充电法充电曲线如图 2.6 所示，充电电流选择 10 小时率或 20 小时率。

恒流充电法能使蓄电池充电比较彻底，但需经常调节充电电压，而且充电时间较长。

(2) **分段电流充电法**

在充电过程中，为更有效地利用电能而用逐渐减小电流的方法。考虑到蓄电池的具体情况，一般分为数段进行充电，如采用二阶段充电法和三阶段充电法。

① 二阶段充电法。二阶段充电法采用恒电流和恒电压相结合的方法快速充电。其充电曲线如图 2.7所示。先以恒电流充电至预定的电压值，然后改为恒电压充电完成剩余的充电。一般两个阶段之间的转换电压就是第二阶段的恒电压。

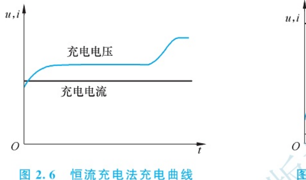


图 2.6 恒流充电法充电曲线

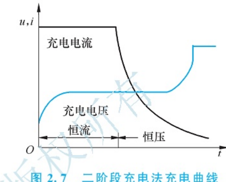


图 2.7 二阶段充电法充电曲线

② 三阶段充电法。三阶段充电法在充电开始和结束时采用恒电流充电，中间用恒电压充电。当电流衰减到预定值时，由第二阶段转换到第三阶段。这种方法可以将出气量降到最少，但作为一种快速充电方法使用，受到一定的限制。

(3) **恒压充电法**

恒压充电法的充电电源的电压在全部充电时间里保持恒定的数值，随着蓄电池端电压的逐渐升高，电流逐渐减少。与恒流充电法相比，恒压充电法的充电曲线(图 2.8)更接近于最佳充电曲线。由于采用恒压充电法时充电初期蓄电池的电动势较低，充电电流很大，随着充电的进行，电流将逐渐减少，因此，只需简易控制系统。

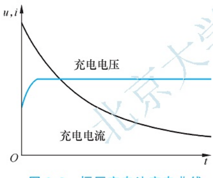


图 2.8 恒压充电法充电曲线

这种充电方法电解水很少，避免了蓄电池过充电。但在充电初期电流过大，对蓄电池使用寿命造成很大影响，而且容易使蓄电池极板弯曲，造成蓄电池报废。恒压充电很少使用，只有在充电电源电压低而电流大时才采用。汽车行驶过程中，蓄电池是以恒压充电法充电的。

(4) **恒压限流充电法**

为了克服恒压充电法充电初期电流过大，而使充电设备不能承受的缺点，常采用恒压限流充电法来代替恒压充电法。在充电第一阶段，用恒定的电流充电；在蓄电池端电压达到一定电压后，维持此电压恒定不变，转为第二阶段的恒压充电过程，当充电电流下降到一定值后，继续维持恒压充电大约 1h 即可停止充电。

2. 快速充电法

为了能够最大限度地加快蓄电池的化学反应速率，缩短蓄电池达到满充状态的时间，同时保证蓄电池正、负极板的极化现象尽量少或轻，提高蓄电池的使用效率，快速充电技术近年来得到了迅速发展。

（1）蓄电池快速充电的原理

由蓄电池的化学反应原理可知，蓄电池在充放电的过程中要产生氧气。在密封式铅酸蓄电池中，这些正极产生的氧气可以通过隔膜和气室被负极吸收，整个化学反应变成一个循环的反应形式，从而达到免维护的目的。但它的内压是有限的，致使阴极吸收速率也是有限的。如果充电电压过高，正极产生氧气的速率过快，吸收速率跟不上氧气的产生速率，长时间必然造成电池失水，从而诱发蓄电池的微短路、硫酸化等失效现象，损害蓄电池的质量和使用寿命。同时，高速率充电时蓄电池的极化会造成蓄电池内部压力上升、蓄电池温度上升、蓄电池内阻升高等，这不仅会缩短蓄电池的使用寿命，而且有可能对蓄电池造成永久性伤害，还会使蓄电池可接受的充电电流下降，蓄电池不可能充到标称容量。

蓄电池的这一化学反应原理是制定快速充电方法的依据。快速充电要想方设法加快蓄电池的化学反应速率(提高充电电压或电流等)，使充电速度得到最大的提高；快速充电又要保证负极的吸收能力，使负极能够跟得上正极氧气产生的速率，同时要尽可能地消除蓄电池的极化现象。这一原理也表明，蓄电池的快速充电的速率是有上限的，不可能无限制地提高蓄电池的充电速率。

要想提高蓄电池的化学反应速率，有两种方式：一是改进蓄电池的结构以降低内阻和提高反应离子的扩散速率；二是改进蓄电池的充电方法，允许加大充电电流，缩短充电时间。

（2）几种快速充电方法

① **脉冲式充电法**。脉冲式充电法先用脉冲电流对蓄电池充电，然后停充一段时间，如此循环，如图 2.9 所示。充电脉冲使蓄电池充满电量，而间歇期使蓄电池经化学反应产生的氧气和氢气有时间重新化合而被吸收掉，使浓差极化和欧姆极化自然而然地得到消除，从而减轻了蓄电池的内压，使下一轮的恒流充电能够更加顺利地进行，使蓄电池可以吸收更多的电量。间歇脉冲使蓄电池有较充分的反应时间，减少了析气量，提高了蓄电池的充电电流接受率。

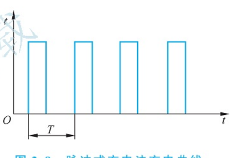


图 2.9　脉冲式充电法充电曲线

② **变电流间歇充电法**。变电流间歇充电法建立在恒流充电和脉冲充电的基础上，如图 2.10 所示。其特点是将恒流充电段改为限压变电流间歇充电段。充电前期的各段采用变电流间歇充电法，保证加大充电电流，获得绝大部分充电量。充电后期采用恒压充电法，获得过充电量，将蓄电池恢复至完全充电态。通过间歇停充，使蓄电池经化学反应产生的氧气和氢气有时间重新化合而被吸收掉，使浓差极化和欧姆极化自然而然地得到消除，从而减轻了蓄电池的内压，使下一轮的恒流充电能够更加顺利地进行，使蓄电池可以吸收更多的电量。

③ **变电压间歇充电法**。变电压间歇充电法充电曲线如图 2.11 所示。变电压间歇充电法与变电流间歇充电法的不同之处在于第一阶段不是间歇恒流，而是间歇恒压。

比较图 2.10 和图 2.11 可以看出，图 2.11 更加符合最佳充电的充电曲线。在每个恒压充电阶段，充电电流自然按照指数规律下降，符合蓄电池电流可接受率随着充电的进行逐渐下降的特点。

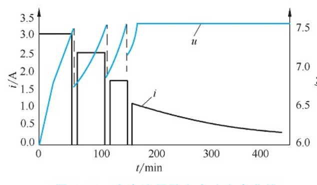


图 2.10 变电流间歇充电法充电曲线

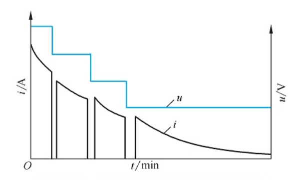


图 2.11 变电压间歇充电法充电曲线

2.2.6 铅酸蓄电池荷电状态估计

蓄电池剩余容量的多少一般用蓄电池荷电状态来描述。蓄电池荷电状态是无量纲的量，既可以反映蓄电池剩余的电量，又可以反映蓄电池消耗的电量。蓄电池荷电状态估算是蓄电池管理系统的核心部分，也是蓄电池管理技术的难点之一。电动汽车蓄电池在使用过程中表现为高度非线性，这使得准确估算蓄电池荷电状态具有很大难度。

目前国内外常用的蓄电池荷电状态估计方法主要有放电实验法、安时计量法、开路电压法、负载电压法、电化学阻抗频谱法、内阻法、线性模型法、神经网络法和卡尔曼滤波法等。

1. 放电实验法

放电实验法是最可靠的蓄电池荷电状态估计方法，采用恒定电流进行连续放电，放电电流与时间的乘积即为剩余电量。放电实验法在实验室中经常使用，适用于所有蓄电池。但它也存在如下缺点：一是花费时间长；二是必须中断蓄电池正在进行的工作。

放电实验法不适合行驶中的电动汽车，但可以用于电动汽车蓄电池的检修。

2. 安时计量法

安时计量法是目前最常用的蓄电池荷电状态估计方法。假设放电(或充电)起始状态为 SOC_0，那么当前状态(t_k 时刻)的 SOC_k 表示为

$$SOC_k = SOC_0 - \int_{t_0}^{t_k} \frac{\eta I \mathrm{d}t}{C_e} \tag{2-4}$$

式中，C_e 为蓄电池的额定容量；I 为蓄电池电流；η 为蓄电池充放电效率。

3. 开路电压法

蓄电池的开路电压在数值上接近蓄电池的电动势。铅酸蓄电池的电动势是电解液浓度的函数，而电解液浓度随电池放电成比例降低，故可用开路电压估计蓄电池荷电状态。开路电压法的显著缺点是需要蓄电池长时间静置，以达到电压稳定，而蓄电池状态从工作恢复到稳定，需要几个小时甚至十几个小时，这给测量造成困难；静置时间如何确定也是一个问题，所以该方法只适用于电动汽车驻车状态。在充电初期和末期用开路电压法估计蓄电池荷电状态效果好，一般常与安时计量法结合使用。

4. 负载电压法

蓄电池放电开始瞬间，电压迅速从开路电压变为负载电压，在蓄电池负载电流保持不

变时，负载电压随蓄电池荷电状态变化的规律与开路电压随蓄电池荷电状态变化的规律相似。负载电压法的优点是能够实时估计蓄电池组的蓄电池荷电状态，在恒流放电时，具有较好的效果。实际应用中，剧烈波动的蓄电池电压给负载电压法应用带来困难。解决该问题，要存储大量电压数据，建立动态负载电压和蓄电池荷电状态的数学模型。负载电压法很少应用到实际车辆上，但常用来作为蓄电池充放电截止的判据。

5. 电化学阻抗频谱法

电化学阻抗表示蓄电池电压与电流之间的传递函数，通常是一个复数变量。测量蓄电池阻抗有恒流和恒压两种模式。在恒流模式下，当蓄电池以电流 I 放电或充电时，将频谱为 f 的正弦电流 Δi 叠加在 I 上，得到电压响应 Δv，则蓄电池阻抗定义为

$$\begin{aligned}&\Delta i=I_{\max}\sin(2\pi ft)\\&\Delta v=I_{\max}\sin(2\pi ft-\phi)\\&Z(f)=\frac{V_{\max}}{I_{\max}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi}\end{aligned}\tag{2-5}$$

式中，$I_{\max}$为最大电流；$Z(f)$为蓄电池阻抗；$V_{\max}$为最大电压。

电化学阻抗频谱是用来估计蓄电池荷电状态的有效工具，用实部与虚部表示电化学阻抗频谱得到奈奎斯特图；用幅值与相角表示电化学阻抗频谱得到伯德图。不同的蓄电池荷电状态，蓄电池的奈奎斯特图和伯德图中各曲线的差异具有一定的规律性，这成为估计蓄电池荷电状态的依据。虽然科研人员在应用电化学阻抗频谱法估算蓄电池荷电状态方面做了大量的研究工作，但因这项技术目前仍存在争议，故很少应用到实际中。

6. 内阻法

蓄电池内阻有交流内阻(常称为交流阻抗)和直流内阻之分，它们都与荷电状态有密切关系。

蓄电池交流阻抗为蓄电池电压与电流之间的传递函数，是一个复数变量，表示蓄电池对交流电的反抗能力，用交流阻抗仪来测量。蓄电池交流阻抗受温度影响大，是对蓄电池处于静置后的开路状态，还是对蓄电池在充放电过程中进行交流阻抗测量，存在争议，所以很少用于实车上。

直流内阻表示蓄电池对直流电的反抗能力，等于在同一很短的时间段内，电池电压变化量与电流变化量的比值。实际测量中，将蓄电池从开路状态开始恒流充电或放电，相同时间内负载电压和开路电压的差值除以电流值就是直流内阻。铅酸蓄电池在放电后期，直流内阻明显增大，可用来估计蓄电池的荷电状态。直流内阻的大小受计算时间段影响，若时间段少于 10ms，只能够检测到欧姆内阻；若时间段较长，内阻将变得复杂。准确测量蓄电池单体内阻比较困难，这是直流内阻法的缺点。内阻法适用于放电后期蓄电池荷电状态的估计，可与安时计量法组合使用。

7. 线性模型法

线性模型法是基于电流、电压、荷电状态变化量和上一时刻的荷电状态值间的关系建立线性方程。方程的具体表达式为

$$\begin{aligned}&\Delta \mathrm{SOC}_i=k_0+k_1V_i+k_2I_i+k_3\mathrm{SOC}_{i-1}\\&\mathrm{SOC}_i=\mathrm{SOC}_{i-1}+\Delta\mathrm{SOC}_i\end{aligned}\tag{2-6}$$

式中，SOC_i 为当前时刻的荷电状态值；SOC_{i-1} 为上一时刻的荷电状态值；ΔSOC_i 为荷电状态的变化量；V_i、I_i 分别为当前时刻的电压与电流；$k_0 \sim k_3$ 为参考数据，可通过最小二乘法得到其值，无物理意义。

上述模型适用于小电流放电且蓄电池荷电状态变化缓慢的情况，对测量误差和错误的初始条件有很高的鲁棒性。

8. 神经网络法

蓄电池是高度非线性的系统，对其充放电过程很难建立准确的数学模型。神经网络具有非线性的基本特性，并具有并行结构和学习能力，对于外部激励，能给出相应的输出，所以能够模拟蓄电池的动态特性来估计蓄电池荷电状态。估计蓄电池荷电状态常采用三层典型神经网络，即输入层、中间层和输出层。输入层、输出层神经元个数根据实际问题的需要来确定，一般为线性函数，常用电压、电流、累积放出电量、温度、内阻及环境温度等作为输入变量；中间层神经元个数取决于问题的复杂程度及分析精度。神经网络法适用于各种蓄电池，其缺点是需要大量的参考数据进行训练，估计误差受训练数据和训练方法的影响很大。

9. 卡尔曼滤波法

利用卡尔曼滤波法估算蓄电池荷电状态的研究是在近些年才开始的。卡尔曼滤波法的一个显著特点是用状态空间的概念来描述其数学模型。卡尔曼滤波法另一个特点是它的解是递归计算的，而且可不加修改地应用于平稳和非平稳环境。

2.3 镍氢蓄电池

镍氢蓄电池是20世纪90年代发展起来的一种新型绿色电池，具有高能量、长寿命、无污染等特点。相对于铅酸蓄电池，镍氢蓄电池在能量密度和比功率方面有了很大提高。

2.3.1 镍氢蓄电池的分类与结构

1. 镍氢蓄电池的分类

按照外形，镍氢蓄电池可以分为方形镍氢蓄电池和圆形镍氢蓄电池。

2. 镍氢蓄电池的结构

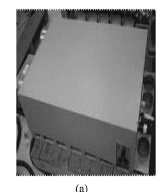
镍氢蓄电池主要由正极、负极、极板、隔板、电解液等组成。

镍氢蓄电池的正极是活性物质氢氧化镍，负极是储氢合金，用氢氧化钾作为电解质，在正负极之间有隔膜，共同组成镍氢单体电池。镍氢蓄电池在金属铂的催化作用下，完成充电和放电的可逆反应。

镍氢蓄电池的极板有发泡体和烧结体两种。发泡体极板的镍氢蓄电池在出厂前必须进行预充电，而且放电电压不能低于0.9V。这是因为其工作电压不太稳定，特别是在存放一段时间后，会有近20%的电荷流失，老化现象比较严重。为避免发泡体极板镍氢蓄电池老化所造成的内阻增高，镍氢蓄电池在出厂前必须进行预充电。经过改进的烧结体极板镍

氢蓄电池，其烧结体极板本身就是活性物质，不需要进行活性处理，也不需要进行预充电，电压平衡、稳定，具有低温放电性能好、不易老化和使用寿命长的优点。

镍氢蓄电池的基本单元是单体电池，按使用要求组合成不同电压和不同电荷量的镍氢蓄电池总成。图 2.12 所示为我国自主研发的电动汽车用镍氢蓄电池。


(a)



(b)

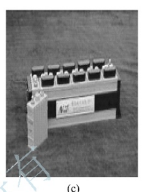

(c)

图 2.12 我国自主研发的电动汽车用镍氢蓄电池

2.3.2 镍氢蓄电池的特点

镍氢蓄电池具有无污染、高比能、大功率、快速充放电、耐用等许多优异特性。与铅酸蓄电池相比，镍氢蓄电池除具有比能量高、质量轻、体积小等特点以外，还具有以下特点。

(1) 比功率高。目前商业化的镍氢功率型蓄电池比功率能达到 1350W/kg。

(2) 循环寿命长。目前应用在电动车上的镍氢蓄电池，80%放电深度循环寿命可以达 1000 次以上，为铅酸蓄电池的三倍以上；100%放电深度循环寿命也在 500 次以上，在混合动力汽车中可使用五年以上。

(3) 无污染。镍氢蓄电池不含铅、镉等对人体有害的金属，为 21 世纪“绿色环保电源”。

(4) 耐过充电、过放电。

(5) 有一定的记忆效应。

(6) 使用温度范围宽。正常使用温度为−30～55℃；储存温度为−40～70℃。

(7) 安全可靠。短路、挤压、针刺、安全阀工作能力、跌落、加热、耐振动等安全性、可靠性试验无爆炸、燃烧现象。

2.3.3 镍氢蓄电池的工作原理

镍氢蓄电池是将物质的化学反应产生的能量直接转化为电能的一种装置。镍氢蓄电池由镍氢化合物正极、储氢合金负极及碱性电解液(如 30%的氢氧化钾溶液)组成。密封镍氢蓄电池的性能特点主要取决于本身体系的电极反应。

充电时阳、阴极的化学反应为

$$Ni(OH)_2 - e^- + OH^- \longrightarrow NiOOH + H_2O$$

$$2MH + 2e^- \longrightarrow 2M^- + H_2\uparrow$$

放电时正、负极的化学反应为

$$NiOOH + H_2O + e^- \longrightarrow Ni(OH)_2 + OH^-$$

$$2M^- + H_2 \longrightarrow 2MH + 2e^-$$

当镍氢蓄电池以标准电流放电时，平均工作电压为1.2V。当电池以8C率放电时，端电压降至1.1V时，则认为放电已毕。电压1.1V称为8C率放电时的放电终止电压(0.6～0.8V)。

2.3.4 镍氢蓄电池的充放电特性

镍氢蓄电池的充放电特性可以通过对电池进行不同倍率的充放电实验获得。通常电池在一定电流下进行充电和放电时都是使用曲线来表示电池的端电压和温度随时间的变化，把这些曲线称为电池的特性曲线。

一般充放电电流的大小常用充放电倍率来表示，即

$$充放电倍率=充放电电流/额定容量$$

例如，额定容量为100A·h的电池用20A放电时，其放电倍率为0.2C。

1. 镍氢蓄电池的充电特性

在充电起始阶段，蓄电池端电压迅速上升，随着时间的延长，蓄电池电压上升减缓，蓄电池的容量与蓄电池的端电压有一定的对应关系，如图2.13中曲线1所示。

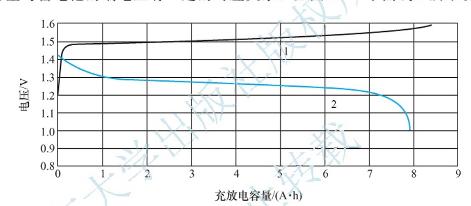


图2.13 蓄电池常温5C充电曲线

曲线1—5C充电8.4A·h；曲线2—常温0.5C放电至1.0V

蓄电池在高温情况下充电，虽然充电时间较长，但充电效率下降，导致放电容量减少，如图2.14所示。

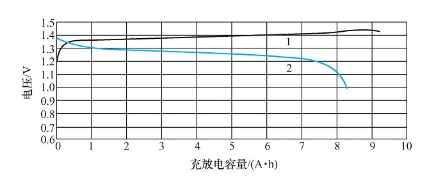


图2.14 蓄电池高温(45℃)充电曲线

曲线1—高温(45℃)1C充电9.24A·h；曲线2—常温0.5C放电至1.0V

在充电电流的作用下，蓄电池的端电压迅速上升，而且充电电流越大，充电效率越低；在充电结束后，由于蓄电池极化作用的消失，蓄电池端电压逐渐下降。

2. 镍氢蓄电池的放电特性

随着放电时间的延续，蓄电池的端电压不断下降。放电电流越大，蓄电池所能放出的安时量越小，电池的端电压越低，如图 2.15 所示。

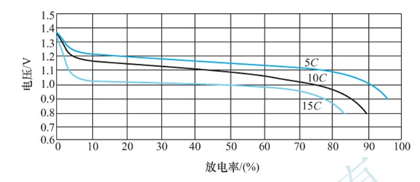


图 2.15　蓄电池常温下不同倍率放电曲线

在相应电流下，可知温度随充电放电过程的变化情况，同时也可以根据充放电电流的大小和时间计算出充放电容量。

虽然常温下延长了充电时间，但在低温情况下，电池放电容量将会下降，如图 2.16 所示。

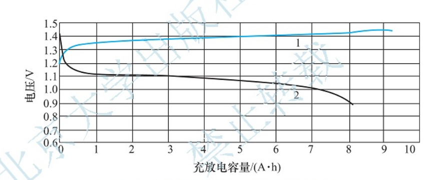


图 2.16　蓄电池低温(−18℃)放电曲线

曲线 1—常温 0.5C 充电 9.24A·h；曲线 2—低温(−18℃)1C 放电至 0.9V

2.3.5　镍氢蓄电池的荷电状态估计

镍氢蓄电池荷电状态估计方法很多，铅酸蓄电池荷电状态的估计方法有些也适用于镍氢蓄电池。这里介绍的镍氢蓄电池荷电状态的估计模型如图 2.17 所示。由神经网络根据蓄电池的外特性参数对蓄电池的荷电状态值进行预估，再用卡尔曼滤波递推算法对荷电状态进行最优估计以提高精度。由卡尔曼滤波原理可知，要想利用卡尔曼滤波对荷电状态进行状态估计，就必须有荷电状态的信号模型和测量方程。有了它们，就可以利用卡尔曼滤波的递推公式对荷电状态值进行最优化的滤波估计。

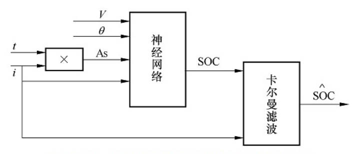


图 2.17　镍氢蓄电池荷电状态的估计模型

1. 蓄电池荷电状态估计的神经网络结构

采用三层径向神经网络，输入层只是传递输入信号到隐层，隐层采用高斯函数，输出层采用的是纯线性函数。确定蓄电池端电压 V、蓄电池温度 θ、蓄电池放电或充电的安培秒 As 为三个输入变量，输出变量为蓄电池的荷电状态值。这样通过网络预估得到的 SOC 为

$$\mathrm{SOC} = \sum_{j=1}^{N_h} w_j u_j(\boldsymbol{X}) \tag{2-7}$$

式中，w_j——隐层节点到输出节点的权重；

$u_j(\boldsymbol{X})=\exp\left[-\frac{(\boldsymbol{X}-C_j)^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{X}-C_j)}{2\delta_j^2}\right]$，$j=1$，2，3，…，其中，$C_j$，$\delta_j$ 为高斯函数的中心值和标准化常数；

$\boldsymbol{X}$——输入向量(V，θ，As)。

2. 卡尔曼滤波器的信号模型与输出方程的确定

由荷电状态的定义可知

$$\mathrm{SOC}=\frac{Q_{\mathrm{res}}}{Q_n} \tag{2-8}$$

$$Q_{\mathrm{res}}(i,t,\theta)=Q_n(I,\theta)-\int_0^t \eta_{\mathrm{A}}(i_{\mathrm{a}})i_{\mathrm{a}}\mathrm{d}t \tag{2-9}$$

$$\eta_{\mathrm{A}}(i_{\mathrm{a}})=\frac{Q_I}{Q_i}=\left(\frac{i_{\mathrm{a}}}{I}\right)^{n-1} \tag{2-10}$$

联立上述三个方程，可得蓄电池放电时荷电状态的信号方程为

$$\mathrm{SOC}(t)=1-Q_n^{-1}\int_0^t\left(\frac{i_{\mathrm{a}}(t)}{I}\right)^n I\,\mathrm{d}t \tag{2-11}$$

式中，n 为普克特常数。

令 $\mathrm{SOC}(t)=x(t)$，在等式两边对时间 t 求导，得

$$x'(t)=\frac{Q_n^{-1}i_{\mathrm{a}}^n}{I^{n-1}},\quad x(0)=1 \tag{2-12}$$

令 $u(t)=i_{\mathrm{a}}^n(t)$，并考虑系统噪声，即由于模型的不确定性而产生的模型噪声，得系统方程为

$$x'(t)=-\frac{Q_n^{-1}u(t)}{I^{n-1}}+w(t) \tag{2-13}$$

输出方程为

$$y(t)=x(t)+v(t) \tag{2-14}$$

式中，$w(t)$为系统噪声；$v(t)$为测量噪声。

对以上两个方程进行采用零阶保持采样离散化，得

$$x(k+1)=Ax(k)+Bu(k)+w(k) \tag{2-15}$$

$$y(k)=Cx(k)+v(k) \tag{2-16}$$

式中，$A=1$；$B=\left(-\frac{1}{Q_n I^{n-1}}\right)$；$C=1$。

现假定 $w(k)$与 $v(k)$是均值为零、互不相关的高斯白噪声，则有

$E[w(k)]=0$；$E[v(k)]=0$；$E[w(k)]^2=\delta_w^2$；$E[v(k)]^2=\delta_v^2$；$E[w(k)v(k)]=0$

其中，δ_w 和 δ_v 可以在实验中获得，这样就可以根据控制信号 $u(k)$ 和测量输出 $y(k)$ 估计状态变量 $x(k)$，即蓄电池的荷电状态值。

2.4 锂离子蓄电池

锂离子蓄电池是1990年由日本索尼公司首先推向市场的新型高能蓄电池。与其他蓄电池比较，锂离子蓄电池具有电压高、比能量高、充放电寿命长、无记忆效应、无污染、充电快速、自放电率低、工作温度范围宽和安全可靠等优点。它已成为未来电动汽车较理想的动力电源。



【锂离子蓄电池】



【软包锂离子蓄电池】

2.4.1 锂离子蓄电池的分类与结构

1. 锂离子蓄电池的分类

锂离子蓄电池的分类如图2.18所示。

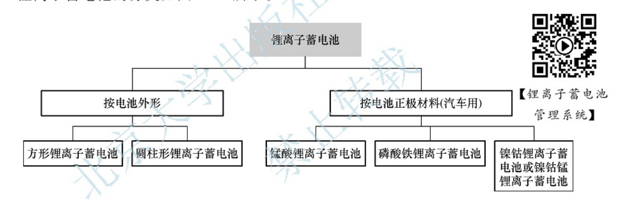


图2.18 锂离子蓄电池的分类

第一代车用锂离子蓄电池是锰酸锂离子蓄电池。用于锂离子蓄电池正极材料的锰酸锂（$LiMn_2O_4$）具有尖晶石结构，其理论容量为148mA·h/g，实际容量为90～120mA·h/g，工作电压为3～4V。该正极材料的主要优点为锰资源丰富、价格便宜、安全性高、比较容易制备。该正极材料的缺点是理论容量不高；材料在电解质中会缓慢溶解，即与电解质的相容性不太好；在深度充放电的过程中，材料容易发生晶格畸变，造成蓄电池容量迅速衰减，特别是在较高温度下使用时更是如此。为了克服以上缺点，近年来发展起来一种层状结构的三价锰氧化物 $LiMnO_2$。试验表明，用 $LiMnO_2$ 作正极材料的锂离子蓄电池的理论容量和实际容量都得到了提高，而且有效地解决了上述部分问题，但 $LiMnO_2$ 也存在较高工作温度下的溶解问题。解决的办法是对 $LiMnO_2$ 进行掺杂和表面修饰，目前已经取得可喜进展。

第二代是具有美国专利的磷酸铁锂离子蓄电池。磷酸铁锂离子蓄电池是指用磷酸铁锂作为正极材料的锂离子蓄电池。磷酸铁锂离子蓄电池是用来作锂离子二次电池的，现在主要方向是动力电池。磷酸铁锂（$LiFePO_4$）具有橄榄石晶体结构，是近年来研究的热门锂离子蓄电池正极材料之一。其理论容量为170mA·h/g，在没有掺杂改性时其实际容量已高达

110mA·h/g。通过对磷酸铁锂进行表面修饰，其实际容量可高达165mA·h/g，已经非常接近理论容量，工作电压在3.4V左右。磷酸铁锂稳定性高、更安全可靠、更环保并且价格低廉。磷酸铁锂的出现是锂离子蓄电池材料的一项重大突破，已成为各国竞相研究的热点。目前磷酸正极材料被认为是非常有发展前途的动力电池正极材料。磷酸铁锂的缺点是电阻率较大，电极材料利用率低。因此研究工作主要集中在解决其电导率问题上。目前广泛采用包覆碳及加碳制成复合材料来提高其电导率。

磷酸铁锂离子蓄电池的优点如下。

(1) **超长寿命**。磷酸铁锂动力电池的循环寿命达到2000次以上，标准充电(5小时率)使用，可达到2000次。

(2) **使用安全**。磷酸铁锂完全解决了钴酸锂和锰酸锂的安全隐患问题。钴酸锂和锰酸锂在强烈的碰撞下会产生爆炸对消费者的生命安全构成威胁，而磷酸铁锂已经过严格的安全测试，即使在最恶劣的交通事故中也不会产生爆炸。

(3) **可大电流快速充放电**。可大电流$2C$快速充放电；在专用充电器下，$1.5C$充电40min内即可使电池充满；起动电流可达$2C$，而铅酸蓄电池现在无此性能。

(4) **耐高温**。磷酸铁锂电热峰值可达350～500℃，而锰酸锂和钴酸锂只在200℃左右；工作温度范围宽广(−20～75℃)，有耐高温特性。

(5) **无记忆效应**。可充电池经常在充满电不放完电的条件下工作，容量会迅速低于额定容量值，这种现象叫作记忆效应。像镍氢蓄电池、镍镉蓄电池存在记忆性，而磷酸铁锂离子蓄电池无此现象，电池无论处于什么状态，可随充随用，无须先放完电再充电。

(6) **体积小、质量轻**。同等规格容量的磷酸铁锂离子蓄电池的体积是铅酸蓄电池体积的2/3，质量是铅酸蓄电池的1/3。

(7) **绿色环保**。磷酸铁锂离子蓄电池不含任何重金属与稀有金属(镍氢蓄电池需稀有金属)，无毒(SGS认证通过)，无污染，是绝对的绿色环保电池。

磷酸铁锂离子蓄电池也有缺点，如磷酸铁锂正极材料的振实密度较小，等容量的磷酸铁锂离子蓄电池的体积要大于钴酸锂离子蓄电池等，因此在微型电池方面不具有优势。

为了避开磷酸铁锂离子蓄电池的专利纠纷，一些国家开发了镍钴锂离子蓄电池或镍钴锰锂离子蓄电池。因为钴价格昂贵，所以其成本较高，安全性比磷酸铁锂离子蓄电池稍差，循环寿命优于锰酸锂离子蓄电池。

【别克VELITE 5高性能锂离子蓄电池组】



图2.19 圆柱形锂离子蓄电池结构

1—绝缘体；2—垫圈；3—PTC元件；4—正极端子；5—排气孔；6—防爆阀；7—正极引线；8—隔板；9—负极；10—负极引线；11—正极；12—外壳

2. 锂离子蓄电池的结构

锂离子蓄电池由正极、负极、隔板、电解液和安全阀等组成。圆柱形锂离子蓄电池结构如图2.19所示。

(1) 正极

正极物质在锰酸锂离子蓄电池中以锰酸锂为主要原料，在磷酸铁锂离子蓄电池中以磷酸铁锂为主要原料，在镍钴锂离子蓄电池

中以镍钴锂为主要材料，在镍钴锰锂离子蓄电池中以镍钴锰锂为主要材料。在正极活性物质中再加入导电剂、树脂黏合剂，并涂覆在铝基体上，呈细薄层分布。

（2）负极

负极活性物质是由碳材料与黏合剂的混合物再加上有机溶剂调和制成糊状，并涂覆在铜基上，呈薄层状分布。

（3）隔板

隔板起关闭或阻断通道的作用，一般为聚乙烯或聚丙烯材料的微多孔膜。所谓关闭或阻断功能是电池出现异常温度上升，阻塞或阻断作为离子通道的细孔，使蓄电池停止充放电反应。隔板可以有效防止因外部短路等引起的过大电流而使蓄电池产生异常发热现象。这种现象只要产生一次，蓄电池就不能正常使用。

（4）电解液

电解液是以混合溶剂为主体的有机电解液。为了使主要电解质成分的锂盐溶解，必须具有高电容率，并且具有与锂离子相容性好的溶剂，即不阻碍离子移动的低黏度的有机溶液为宜，而且在锂离子蓄电池的工作温度范围内，必须呈液体状态，凝固点低，沸点高。电解液对于活性物质具有化学稳定性，必须良好适应充放电反应过程中发生的剧烈的氧化还原反应。由于使用单一溶剂很难满足上述严酷条件，因此电解液一般混合不同性质的几种溶剂使用。

（5）安全阀

为了保证锂离子蓄电池的使用安全性，一般通过对外部电路的控制或者在蓄电池内部设置异常电流切断的安全装置。即使这样，在使用过程中也有可能因其他原因引起蓄电池内压异常上升，这时，安全阀释放气体，以防止蓄电池破裂。安全阀实际上是一次性非修复式的破裂膜，一旦进入工作状态，蓄电池便停止工作，因此安全阀是蓄电池的最后保护手段。

2.4.2 锂离子蓄电池的特点

锂离子蓄电池有许多显著特点，它的优点主要如下。

（1）工作电压高。锂离子蓄电池工作电压为3.6V，是镍氢蓄电池和镍镉蓄电池工作电压的3倍。

（2）比能量高。锂离子蓄电池比能量已达到150W·h/kg，是镍镉蓄电池的3倍，镍氢蓄电池的1.5倍。

（3）循环寿命长。目前锂离子蓄电池循环寿命已达到1000次以上，在低放电深度下可达几万次，超过了其他几种蓄电池。

（4）自放电率低。锂离子蓄电池的月自放电率仅为6%～8%，远低于镍镉蓄电池和镍氢蓄电池。

（5）无记忆效应。锂离子蓄电池可以根据要求随时充电，而不会降低电池性能。

（6）对环境无污染。锂离子蓄电池中不存在有害物质，是名副其实的“绿色电池”。

（7）能够制造成任意形状。

锂离子蓄电池也有一些不足，主要表现在以下方面。

（1）成本高。主要是正极材料的价格高，但按单位瓦时的价格来计算，已经低于镍氢蓄电池，与镍镉蓄电池持平，高于铅酸蓄电池。

(2) 必须有特殊的保护电路，以防止过充电。

2.4.3 锂离子蓄电池的工作原理

锂离子蓄电池的正极材料为锂化合物 $LiCoO_2$、$LiNiO_2$ 或 $LiMn_2O_4$，负极为锂-碳层间化合物 Li_xC_6，电解液为有机溶液。典型的电池体系为

$$(-)C|LiPF_6——EC+DEC|LiCoO_2(+)$$

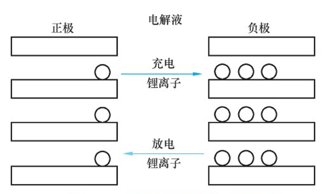


图 2.20 锂离子蓄电池的工作原理

图 2.20 所示为锂离子蓄电池的工作原理。蓄电池在充电时，锂离子从正极材料的晶格中脱出，通过电解液和隔膜，嵌入负极中；放电时，锂离子从负极脱出，通过电解液和隔膜，嵌入正极材料的晶格中。在整个充放电过程中，锂离子往返于正负极之间。

以 $LiCoO_2$ 为正极材料，石墨为负极材料的锂离子蓄电池为例，其正、负极的化学反应为

$$LiCoO_2 \longrightarrow Li_{1-x}CoO_2 + xLi^+ + xe^-$$

$$6C + xLi^+ + xe^- \longrightarrow Li_xC_6$$



【锂离子蓄电池的工作原理】

总反应为

$$LiCoO_2 + 6C \longrightarrow Li_{1-x}CoO_2 + Li_xC_6$$

由于锂离子蓄电池只涉及锂离子而不涉及金属锂的充放电过程，从根本上解决了由于锂枝晶的产生而带来的电池循环性和安全性的问题。

2.4.4 锂离子蓄电池的充放电特性

在电压方面，锂离子蓄电池对充电终止电压的精度要求很高，一般误差不能超过额定值的1%。终止电压过高，会影响锂离子蓄电池的寿命，甚至造成过充电现象，对蓄电池造成永久性的损坏；终止电压过低，又会使充电不完全，蓄电池的可使用时间变短。

充电电流方面，锂离子蓄电池的充电率(充电电流)应根据电池生产厂的建议选用。虽然某些锂离子蓄电池的充电率可达 $2C$，但常用的充电率为$(0.5\sim1)C$。在采用大电流对锂离子蓄电池充电时，因充电过程中蓄电池内部的电化学反应会产生热，因此有一定的能量损失，同时必须检测蓄电池的温度以防过热损坏电池或产生爆炸。此外对锂离子蓄电池充电，若全部用恒定电流充电，虽然可以在一定程度上缩短充电时间，但很难保证充满电，如果对充电结束控制不当还会造成过充电现象。

放电方面，锂离子蓄电池的最大放电电流一般被限制在$(2\sim3)C$。更大的放电电流会使蓄电池发热严重，对蓄电池的组成物质造成损坏，影响蓄电池的使用寿命。同时，由于大电流放电时，蓄电池的部分能量转换为热能，因此蓄电池的放电容量将会降低。在造成过放电(低于3.0V)时，还会造成蓄电池的失效。对于过放电的锂离子蓄电池，在充电前需要进行预处理，即用小电流充电，使蓄电池内部过放电的单元被激活。在蓄电池电压达到3.0V后再按正常方式充电，通常将这一阶段的充电称为预充电。

锂离子蓄电池的充电温度一般应该限制在0～60℃。蓄电池温度过高会损坏蓄电池并可能引起爆炸；温度过低虽不会造成安全方面的问题，但很难将蓄电池充满。由于充电过

程中，蓄电池内部将产生一部分热量，因此在大电流充电时，需要对蓄电池进行温度检测，并且在超过设定充电温度时停止充电以保证安全。

2.4.5 锂离子蓄电池的充电方法

锂离子蓄电池可以采用不同的充电方法，其中最简单的充电方法是恒压充电。采用恒压充电时，蓄电池电压保持不变，而充电电流将逐渐降低。当充电电流降到低于0.1C时，就认为蓄电池被充分充电了。为了防止有缺陷的蓄电池无休止地进行充电，采用一个备用定时器来终止充电周期。恒压充电是一种相对节省成本的方法，但是这种充电方法的充电时间很长。由于在蓄电池充电期间充电电压保持恒定，充电电流降低得很快，因而充电速率也降低得很快。这样，蓄电池就只是在比其能够接受的低得多的电流强度下进行充电。



【比亚迪电动汽车充电系统】

兼顾充电过程的安全性、快速性和蓄电池使用的高效性，锂离子蓄电池通常都采用恒流恒压充电方法，其充电过程可分为预充电、恒流充电、恒压充电三个阶段，如图2.21所示。

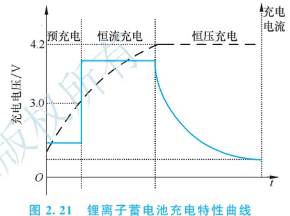


图2.21 锂离子蓄电池充电特性曲线

1. 预充电阶段

在该状态下，首先检测单节锂离子蓄电池的电压是否较低(小于3.0V)，如果电压较低，则采用涓流充电，即以一个比较小的恒定电流对电池进行充电直至电池电压上升到一个安全值；否则可省略该阶段，这也是最普遍的情况。因为预充电主要是完成对过放电的锂离子蓄电池进行修复。

2. 恒流充电阶段

涓流充电后，充电器转入恒流充电状态。该状态下，充电电流保持不变的较大的值，蓄电池的最大充电电流取决于蓄电池的容量。

在恒流充电和预充电状态下，通过连续监控蓄电池的电压和温度，可以采用以下两种恒流充电终止法，终止恒流充电。

(1) 蓄电池最高电压终止法。当单节锂离子蓄电池电压达到4.2V时，恒流充电状态应立即终止。

(2) 蓄电池最高温度终止法。在恒流充电过程中，当蓄电池的温度达到60℃时，恒流充电状态应立即终止。

3. 恒压充电阶段

恒流充电结束后，则转入恒压充电状态。在该状态下，充电电压保持恒定。因为锂离子蓄电池对充电电压精度的要求比较高，单节锂离子蓄电池恒压充电电压应在规定值的±1%之间变化，因此要严格控制锂离子蓄电池的充电电压。在恒压充电过程中，充电器连续监控蓄电池的电压、温度、充电电流和充电时间。

常用的恒压充电终止方法有以下四种。

(1) 蓄电池最高电压。当单节锂离子蓄电池的电压达到4.25V时，恒压充电状态自动

终止。

(2) 蓄电池最高温度。当锂离子蓄电池的最高温度达到60℃时，恒压充电状态自动终止。

(3) 最长充电时间。为了确保锂离子蓄电池安全充电，除了设定最高电压和最高温度外，还应设置最长恒压充电时间，在温度和电压检测失败的情况下，可以保证锂离子蓄电池安全充电。

(4) 最小充电电流。在恒压充电过程中，锂离子蓄电池的充电电流逐渐减小，当充电电流下降到一定数值(通常为恒流充电电流的1/10)时，恒压充电状态自动终止。

此外，蓄电池充足电后，若仍插在充电器上，蓄电池会由于自放电而损失电量。充电器应以非常小的电流对蓄电池充电或是监测蓄电池电位以备对蓄电池再充电，这种状态称为维护充电状态。

铅酸蓄电池、镍氢蓄电池和锂离子蓄电池的技术性能见表2-2。

表2-2 铅酸蓄电池、镍氢蓄电池和锂离子蓄电池的技术性能

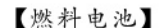
技术性能	铅酸蓄电池	镍氢蓄电池	锂离子蓄电池
工作电压/V	2.0	1.2	3.6
比能量/(W·h/kg)	40～60	65～80	125～150
比功率/(W/kg)	150～200	160～230	250～400
充放电寿命/次	500～700	600～1200	800～1200
自放电率/(%)(每月)	3	30～35	6～8
有无记忆效应	有	有	无
有无污染	有	无	无

2.5 燃料电池

燃料电池(Fuel Cell，FC)是一种化学电池。它直接把物质发生化学反应时释出的能量转换为电能，工作时需要连续地向其供给活物质(起反应的物质)——燃料和氧化剂。由于它是把燃料通过化学反应释出的能量转换为电能输出，因此称为燃料电池。燃料电池被称为继火电、水电、核电之后的第四种发电方式。燃料电池能量密度极高，接近于汽油和柴油的能量密度，几乎是零污染，号称“终极电池”，代表着未来电动汽车动力的发展方向，也是重点研发的领域之一。

2.5.1 燃料电池的分类

1. 按燃料电池的运行机理分类


【燃料电池】

根据燃料电池的运行机理，可将燃料电池分为以下两类。

(1) 酸性燃料电池。

(2) 碱性燃料电池。



2. 按电解质分类

根据燃料电池中使用电解质，可将燃料电池分为以下九类。
(1) 质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell，PEMFC)。
(2) 碱性燃料电池(Alkaline Fuel Cell，AFC)。
(3) 磷酸燃料电池(Phosphoric Acid Fuel Cell，PAFC)。
(4) 熔融碳酸盐燃料电池(Molten Carbonate Fuel Cell，MCFC)。
(5) 固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell，SOFC)。
(6) 直接甲醇燃料电池(Direct Methanol Fuel Cell，DMFC)。
(7) 再生型燃料电池(Regenerative Fuel Cell，RFC)。
(8) 锌空燃料电池(Zinc Air Fuel Cell，ZAFC)。
(9) 质子陶瓷燃料电池(Protonic Ceramic Fuel Cell，PCFC)。

3. 按燃料使用类型分类

根据燃料电池的燃料使用类型，可将燃料电池分为以下三类。
(1) 直接型燃料电池。
(2) 间接型燃料电池。
(3) 再生型燃料电池。

4. 按燃料种类分类

根据燃料电池使用的燃料，可将燃料电池分为以下三类。
(1) 氢燃料电池。
(2) 甲醇燃料电池。
(3) 乙醇燃料电池。

5. 按工作温度分类

根据燃料电池的工作温度，可将燃料电池分为以下四类。
(1) 低温型燃料电池(工作温度低于200℃)。
(2) 中温型燃料电池(工作温度为200～750℃)。
(3) 高温型燃料电池(工作温度为750～1000℃)。
(4) 超高温型燃料电池(工作温度高于1000℃)。

6. 按燃料状态分类

根据燃料电池的燃料状态，可将燃料电池分为以下两类。
(1) 液体型燃料电池。
(2) 气体型燃料电池。

2.5.2 燃料电池的特点

1. 燃料电池的优点

燃料电池与蓄电池相比，具有以下优点。

(1) 节能、运转效率高。燃料电池在额定功率下的运转效率可以达到60%，而在部分功率输出条件下运转效率可以达到70%，在过载功率输出条件下运转效率可以达到50%～

55%。高效率随功率变化的范围很宽，在低功率下运转效率高，特别适合于汽车动力性能的要求。

燃料电池短时间的过载能力可以达到额定功率的200%，非常适合汽车在加速和爬坡时动力性能的要求。

（2）排放基本达到零污染。用碳氢化合物作为燃料的燃料电池的主要生成物质为水、二氧化碳和一氧化碳等，属于“超低污染”，氢氧燃料电池的反应产物只有清洁的水。

（3）无振动和噪声，寿命长。这主要与燃料电池的工作过程有关。燃料电池是通过燃料和氧化剂分别在两个电极上发生反应，由电解液和外电路构成回路，将反应中的化学能直接转化为电能。所以在整个工作过程中，没有噪声和机械振动的产生，从而减少了机械器件的磨损，延长了使用寿命。

（4）结构简单、运行平稳。燃料电池的能量转换是在静态下完成的，结构比较简单。构件的加工精度要求低。特别是质子交换膜燃料电池，其能量转换效率高，能够在−80℃的低温条件下起动和运转，对结构件的耐热性能要求也不高。由于无机械振动，因此运行时比较平稳。

2. 燃料电池的缺点

燃料电池具有以下缺点。

（1）燃料种类单一。目前，不论是液态氢、气态氢，还是碳水化合物经过重整后转换的氢，它们均是燃料电池的唯一燃料。氢气的产生、储存、保管、运输和灌装或重整，都比较复杂，对安全性要求很高。

（2）要求高质量的密封。燃料电池的单体电池所能产生的电压约为1V，不同种类的燃料电池的单体电池所能产生的电压略有不同。通常将多个单体电池按使用电压和电流的要求组合成为燃料电池组，在组合时，单体电池间的电极连接时，必须要有严格的密封，因为密封不良的燃料电池，氢气会泄漏到燃料电池的外面，降低了氢的利用率并严重影响燃料电池的效率，还会引起氢气燃烧事故。由于要求严格的密封，使得燃料电池的制造工艺很复杂，并给使用和维护带来很多困难。

（3）价格高。制造成本高，电池价格昂贵。

（4）需要配备辅助电池系统。燃料电池可以持续发电，但不能充电和回收燃料电池汽车再生制动的反馈能量。通常在燃料电池汽车上还要增加辅助电池，来储存燃料电池富裕的电能和在燃料电池汽车减速时接受再生制动时的能量。

表2-3为六种燃料电池的主要特征参数。

表2-3　六种燃料电池的主要特征参数

特征参数	质子交换膜燃料电池	碱性燃料电池	磷酸燃料电池	熔融碳酸盐燃料电池	固体氧化物燃料电池	直接甲醇燃料电池
燃料	H_2	H_2	H_2	CO、H_2	CO、H_2	CH_3OH
电解质	固态高分子膜	碱溶液	液态磷酸	熔融碳酸锂	固体二氧化锆	固态高分子膜
工作温度/℃	≈80	60～120	170～210	60～650	≈1000	≈80
氧化剂	空气或氧气	氧气	空气	空气	空气	空气或氧气

续表

特征参数	质子交换膜燃料电池	碱性燃料电池	磷酸燃料电池	熔融碳酸盐燃料电池	固体氧化物燃料电池	直接甲醇燃料电池
电极材料	C	C	C	Ni-M	Ni-YSZ	C
催化剂	Pt	Pt、Ni	Pt	Ni	Ni	Pt
腐蚀性	中	中	强	强	无	中
寿命/h	100000	10000	15000	13000	7000	100000
特性	比功率高，运行灵活，无腐蚀	高效率，对 CO_2 敏感，有腐蚀	效率较低，有腐蚀	效率高，控制复杂，有腐蚀	效率高，运行温度高，有腐蚀	比功率高，运行灵活，无腐蚀
效率/(%)	>60	60～70	40～50	>60	>60	>60
起动时间	几分钟	几分钟	2～4h	>10h	>10h	几分钟
主要应用领域	航天、军事、汽车、固定式用途	航天、军事	大客车、中小电厂、固定式用途	大型电厂	大型电厂、热站、固定式用途	航天、军事、汽车、固定式用途

2.5.3 燃料电池系统

燃料电池实际上不是“电池”，而是一个大的发电系统。对于质子交换膜燃料电池，需要有燃料供应系统、氧化剂系统、发电系统、水管理系统、热管理系统、电力系统及控制系统等。

1. 燃料供应系统

燃料供应系统是给燃料电池提供燃料，如氢气、天然气、甲醇等。这个系统如果直接采用氢气则比较简单，如果用石化燃料制取氢气则相当复杂。

2. 氧化剂系统

氧化剂系统主要是给燃料电池提供氧气。氧气的来源有从空气中获取氧气或从氧气罐中获取氧气，空气需要用压缩机来提高压力，以增加燃料电池反应的速度。在燃料电池系统中，配套压缩机的性能有特定的要求，压缩机质量和体积会增加燃料电池系统的质量、体积和成本，压缩机所消耗的功率会使燃料电池的效率降低。空气供应系统的各种阀、压力表、流量表等的接头要采取防泄漏措施。在空气供应系统中还要对空气进行加湿处理，保证空气有一定的湿度。

3. 发电系统

发电系统是指燃料电池本身，将燃料和氧化剂中的化学能直接转化为电能，而不需要经过燃烧的过程。它是一个电化学装置。

4. 水管理系统

由于质子交换膜燃料电池中质子是以水合离子状态进行传导的，因此燃料电池需要有水，而且水少会影响电解质膜的质子传导特性，从而影响电池的性能。因为在电池的阴极生成水，所以需要不断、及时地将这些水带走，否则会将电极“淹死”，也会造成燃料电池失效。因此水的管理在燃料电池中至关重要。

5. 热管理系统

大功率燃料电池发电的同时，由于电池内阻的存在，不可避免地会产生热量，通常产生的热与其发电量相当。而燃料电池的工作温度是有一定限制的，如对于质子交换膜燃料电池而言，应控制在80℃，因此需要及时将电池生成热带走，否则会发生过热，烧坏电解质膜。水和空气通常是常用的传热介质。

6. 电力系统

电力系统将燃料电池产生的直流电转换为适合用户使用的电。燃料电池所产生的是直流电，需要经过DC/DC转换器进行调压，在采用交流电动机的驱动系统中，还需要用逆变器将直流电转换为三相交流电。

7. 控制系统

燃料电池控制系统主要包括电池系统的启动与停工，维持电池系统稳定运行的各操作参数的控制，对电池运行状态进行监测、判断等。

8. 安全系统

氢是燃料电池的主要燃料，氢的安全十分重要。氢的安全系统由氢气探测器、数据处理系统及灭火设备等构成。

氢的储存与输送是燃料电池应用的关键技术之一。这里主要介绍储氢和重整制氢。

（1）储氢。目前使用比较广泛的储氢技术有高压储氢、液态储氢和储氢材料储氢。这三种技术在实际运用中的效果很大程度上受到材料性能的制约。储氢材料储氢技术更有优势，尤其是使用碳纳米管储氢时，效果更理想。表2－4为几种储氢技术的比较。

表2－4 几种储氢技术的比较

项目		高压储氢	液态储氢	储氢材料储氢	
				钛系储氢合金	碳纳米管
安全性		低	低	较高	
能源综合利用率		低	较低	高	
储氢能力	单位质量储氢量/（%）	—	—	2	4
	单位体积储氢量/（kg/m³）	31.5	71	61	160
能量密度	单位质量能量密度/（kW·h/kg）	—	—	0.79	5.53
	单位体积能量密度/（kW·h/L）	1.24	2.8	2.4	6.32
优点		简单、方便	储运效率高、装置质量轻、体积小、储氢压力低	安全性好、运输方便、操作比较容易	

续表

项目	高压储氢	液态储氢	储氢材料储氢	
			钛系储氢合金	碳纳米管
缺点	空间有限，必须使用耐高压容器，储氢压力过大，安全性降低，充氢操作复杂，成本增加	氢气液化须耗费大量能源，必须使用耐超低温的特殊容器，使用中存在危险，充氢系统复杂	成本相对较高，受制于材料的储氢性能、储氢器的结构及储氢系统的整体设计	
应用	多	少	少	

随着材料科学的发展，储氢技术的发展主要集中在开发密度更小、强度更高的材料，以提高储氢罐内的压力；开发绝热性能更好的材料，以减少液氢的蒸发，提高使用时的安全性；开发高容量的储氢材料，特别是碳纳米管等。

(2) 重整制氢。燃料电池使用的燃料——氢气可以由重整器提供。重整器使用的原料可以是天然气、汽油、柴油等各种烃类及甲醇、酒精等各种醇类燃料。目前使用较多的重整技术主要有蒸汽重整、部分氧化和催化部分氧化重整、自动供热重整及等离子体重整等。不同的重整技术在结构、效率和对燃料的适应性等方面有不同的特点，并在不同的使用条件下发挥出它们各自的优势。蒸汽重整是目前使用较广泛的制氢方式。

① 蒸汽重整。蒸汽重整是一个化学过程，其中，氢通过碳氢化合物燃料和高温水蒸气之间的化学反应生成。蒸汽重整器的发展经历了常规型、热交换型和平板型三个过程。常规型蒸汽重整器的容量较大，并且已实现商业化，但工作条件高(850℃，1.5～2.5MPa)，制造成本较高，容量大，起动时间长，如果生产出来的氢气不能及时使用，储存也有困难。热交换型重整器外形尺寸大大减小，工作条件降低(700℃，0.3MPa)，制造成本下降，并且随负荷变化性能较好，已成功应用于燃料电池系统中。近年来出现的平板型结构更加紧凑，成本进一步降低，但技术还不成熟。如果在扩大催化剂的使用范围和延长使用寿命上有所突破，平板型蒸汽重整器在蒸汽重整装置中将很有竞争力。

② 部分氧化重整。部分氧化重整将燃料与氧相结合制氢，并生成一氧化碳。部分氧化重整的产氢率比蒸汽重整的低，但它结构紧凑，成本低，起动时间短，动态响应速度快，对燃料的适应性也更强，因而更具潜力。但是，如果采用无催化剂系统，常有炭烟和其他副产物生成；而采用有催化剂系统，又常因催化剂表面的局部高温而损伤催化剂，在反应过程中的稳定性控制也是一大难题。部分氧化重整最好用纯氧，但价格较高；虽然它也可使用燃料气体与空气混合，但反应后需加净化处理装置，其成本也很高。因此若能开发廉价的纯氧制取装置，部分氧化重整将得到很大突破。

③ 自动供热重整。自动供热重整将燃料与水蒸气两者结合，因此，由水蒸气重整反应吸收的热量平衡了从部分氧化重整反应中所放出的热量。相对于蒸汽重整来说，自动供热重整结构简单，无需庞大的换热装置，制造成本低，对燃料的要求也降低，可使用醇类和重烃类的液体燃料；相对于部分氧化重整来说，自动供热重整由于氧化反应放出的热量直接被吸热的蒸汽重整反应吸收，因此系统的效率也提高了。但自动供热重整要求同时调

节好氧气、水蒸气和燃料之间的比例，控制比较困难，并且在重整中易产生积炭现象而损伤催化剂。

④ 等离子体重整。等离子体重整是一种先进的制氢技术。它采用等离子激发重整反应的发生，可在满足制氢效率的情况下进行小规模生产，同时降低成本。一般等离子重整器在中小型制氢系统上经济效益比较明显，因为等离子的能量密度很高，使得重整器结构紧凑，起动快，动态响应快，基本不需要催化剂，而且它对燃料的适应性很强，除轻质烃外，各种重质烃、重油、生物质燃料，甚至垃圾燃料都可用。等离子制氢技术可分为热等离子制氢技术和冷等离子制氢技术两种，产生氢气的过程与传统技术一样，也包括蒸汽重整、部分氧化和热分解等。采用热等离子制氢技术，反应气体温度高，热损大且不易控制，温度升高也产生了对电极的腐蚀。采用冷离子制氢技术，气体温度基本不变，等离子仅起类似催化剂的作用，并且冷等离子重整器的尺寸和质量小，更适用于可移动装置。等离子重整器不宜工作在高压下，因为在高压下限制了电弧的灵活性，增加了电极的腐蚀，从而降低了电极寿命。

2.5.4 质子交换膜燃料电池

质子交换膜燃料电池采用可传导离子的聚合膜作为电解质，所以也称聚合物电解质燃料电池(Polymer Electrolyte Fuel Cell，PEFC)、固体聚合物燃料电池(Solid Polymer Fuel Cell，SPFC)或固体聚合物电解质燃料电池(Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell，SPEFC)。

1. 质子交换膜燃料电池的基本结构

质子交换膜燃料电池由质子交换膜、催化层、扩散层、集流板(又称双极板)组成，如图 2.22 所示。

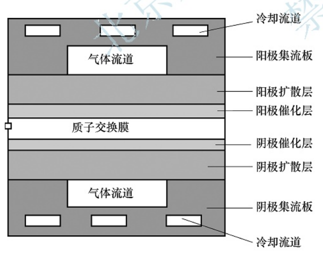


图 2.22 质子交换膜燃料电池结构示意图

(1) **质子交换膜**。质子交换膜是质子交换膜燃料电池中最重要的部件之一，其性能好坏直接影响电池的性能和寿命。质子交换膜燃料电池中的质子交换膜与一般化学电源中使用的隔膜有很大不同，它不只是一种将阳极的燃料与阴极的氧化剂隔开的隔膜材料，还是电解质和电极活性物质(电催化剂)的基底，即兼有隔膜和电解质的作用。另外，质子交换膜还是一种选择透过性膜，在质子交换膜的高分子结构中，含有多种离子基团。它只允许氢离子穿过，其他离子、气体及液体均不能通过。

(2) **电催化剂**。为了加快电化学反应速度，气体扩散电极上都含有一定量的催化剂。质子交换膜燃料电池电催化剂主要有铂系和非铂系电催化剂两类。目前多采用铂催化剂。由于这种电池是在低温条件下工作的，因此，提高电催化剂的活性，防止电极催化剂中毒很重要。

（3）**电极**。质子交换膜燃料电池的电极是一种多孔气体扩散电极，一般由扩散层和催化层构成。扩散层是导电材料制成的多孔合成物，起着支撑催化层，收集电流，并为电化学反应提供电子通道、气体通道和排水通道的作用。催化层是进行电化学反应的区域，是电极的核心部分，其内部结构粗糙多孔，因而有足够的表面积以促进氢气和氧气的电化学反应。因此电极制作的好坏对电池的性能有重要影响。

（4）**膜电极**。膜电极是通过热压将阴极、阳极与质子交换膜复合在一起而形成的。为了使电化学反应顺利进行，多孔气体扩散电极必须具备质子、电子、反应气体和水的连续通道。膜电极性能不仅依赖于电催化剂活性，还与电极中四种通道的构成及各种组分的配比、电极孔分布与孔隙率、电导等因素密切相关。

理想的电极结构必须满足以下条件：反应区必须透气(即高气体渗透性)；气体所到之处需要有催化剂粒子，即催化剂必须分布在能接触到气体分子的表面；催化剂又必须与Nafion膜聚四氟乙烯的阳离子交换膜接触，以保证反应产生的离子顺利通过(即高质子传导性)；作为催化剂载体的炭黑导电性要高，这将有利于电子转移(即高导电性)，因催化剂不能连成片(必须有很大的催化活性表面才能提高催化反应速度，而片状金属表面积小)，难以作为电导体。所以，催化剂粒子上反应产生或需要的电子必须通过导电性物质与电极沟通；催化剂的稳定性要好。高分散、细颗粒的铂催化剂表面自由能大，很不稳定，需要掺入一些催化剂以降低其表面自由能，或者掺入少量含有能与催化剂形成化学键或弱结合力元素的物质。

（5）**集流板与流场**。集流板又称双极板，是电池的重要部件之一，其作用是分隔反应气体，收集电流，将各个单体电池串联起来和通过流场为反应气体进入电极及水的排出提供通道。制备质子交换膜燃料电池集流板广泛采用的材料是炭质材料、金属材料及金属与炭质的复合材料。而对金属板，为改善其在电池工作条件下的抗腐蚀性能，必须进行表面改性处理。

质子交换膜燃料电池的流场一般是指按一定间隔开槽的石墨板，开的槽就是流道，在槽之间形成流道间隔。流场功能是引导反应气流动方向，确保反应气均匀分配到电极各处，经电极扩散层到达催化层参与电化学反应。为提高电池反应气体的利用率，通常排放尾气越少越好。流场设计得好坏直接影响电池尾气的排放量。

在常见的质子交换膜燃料电池中，有的流场与集流板是分体的，如网状流场等；有的流场与集流板是一体的，如点状流场和部分蛇型流场等，这样流场除了具有上述流场的功能以外，还兼顾集流板的作用。至今已开发点状、网状、多孔体、平行沟槽、蛇型和交指型流场。

通常，质子交换膜燃料电池的运行需要一系列辅助设备与之共同构成发电系统。质子交换膜燃料电池系统一般由电池堆、氢气系统、空气系统、水热管理系统和控制系统等构成。

电池堆是系统的核心，承担把化学能转化为电能的任务；氢气系统提供燃料电池正常工作所需的氢气；空气系统提供燃料电池正常工作所需的空气；水热管理系统保证燃料电池堆所需空气、氢气的温度和湿度，保证电池堆在正常温度下工作；控制系统通过检测传感器信号和需求信号，利用一定的控制策略保证系统正常工作。

2. 质子交换膜燃料电池的工作原理

质子交换膜燃料电池在原理上相当于水电解的“逆”装置。其单体电池由阳极、阴极

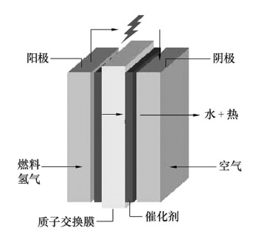


图 2.23　质子交换膜燃料电池的工作原理

【质子交换膜燃料电池的工作原理】

和质子交换膜组成，阳极为氢燃料发生氧化的场所，阴极为氧化剂还原的场所，两极都含有加速电极电化学反应的催化剂，质子交换膜为电解质。其工作原理如图 2.23 所示。

导入的氢气通过阳极集流板经阳极气体扩散层到达阳极催化剂层，在阳极催化剂的作用下，氢分子分解为带正电的氢离子(即质子)并释放出带负电的电子，完成阳极反应；氢离子穿过膜到达阴极催化剂层，而电子则由集流板收集，通过外电路到达阴极，电子在外电路形成电流，通过适当连接可向负载输出电能；在电池另一端，氧气通过阴极集流板经阴极气体扩散层到达阴极催化剂层。在阴极催化剂的作用下，氧与透过膜的氢离子及来自外电路的电子发生反应生成水，完成阴极反应；电极反应生成的水大部分由尾气排出，一小部分在压力差的作用下通过膜向阳极扩散。阴极和阳极发生的化学反应为

$$H_2 \longrightarrow 2H^+ + 2e^-$$

$$4e^- + 4H^+ + O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

总反应为

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

上述过程是理想的工作过程，实际上，整个反应过程中会有很多中间步骤和中间产物的存在。

3. 质子交换膜燃料电池的特点

(1) 质子交换膜燃料电池的优点

① 能量转化效率高。过氢氧化合作用，直接将化学能转化为电能，不通过热机过程，不受卡诺循环的限制。

② 可实现零排放。唯一的排放物是纯净水，没有污染物排放，是环保型能源。

③ 运行噪声低，可靠性高。质子交换膜燃料电池组无机械运动部件，工作时仅有气体和水的流动。

④ 维护方便。质子交换膜燃料电池内部构造简单，电池模块呈现自然的“积木化”结构，使得电池组的组装和维护都非常方便，也很容易实现“免维护”设计。

⑤ 发电效率平稳。发电效率受负荷变化影响很小，非常适于用作分散型发电装置(作为主机组)，也适于用作电网的“调峰”发电机组(作为辅机组)。

⑥ 氢来源广泛。氢是宇宙中含量最丰富的元素。氢气来源极其广泛，是一种可再生的能源。可通过石油、天然气、甲醇、甲烷等进行重整制氢；也可通过电解水制氢、光解水制氢、生物制氢等方法获取氢气。

⑦ 技术成熟。氢气的生产、储存、运输和使用等技术均已成熟、安全、可靠。

(2) 质子交换膜燃料电池的缺点

① 成本高。因为膜材料和催化剂均十分昂贵，但成本在不断地降低，一旦能够大规

模生产，比价的经济效益将会充分显示出来。

② 氢要求高。这种电池需要纯净的氢，因为它们极易受到一氧化碳和其他杂质的污染。

因为质子交换膜燃料电池的工作温度低，起动速度较高，功率密度较高(体积较小)，所以很适于用作新一代交通工具动力。世界各大汽车集团竞相投入巨资，研究开发电动汽车和代用燃料汽车。从发展情况看，质子交换膜燃料电池是技术最成熟的电动车动力源，质子交换膜燃料电池电动汽车被业内公认为电动汽车的未来发展方向。燃料电池将会成为继蒸汽机和内燃机之后的第三代动力系统。

2.5.5 碱性燃料电池

1. 碱性燃料电池的结构与工作原理

碱性燃料电池以强碱(如氢氧化钾、氢氧化钠)为电解质，氢气为燃料，纯氧或脱除微量二氧化碳的空气为氧化剂，采用对氧电化学还原具有良好催化活性的 Pt/C、Ag、Ag - Au、Ni 等为电催化剂制备的多孔气体扩散电极为氧化极，以 Pt - Pd/C、Pt/C、Ni 或硼化镍等具有良好催化氢电化学氧化的电催化剂制备的多孔气体电极为氢电极。以无孔炭板、镍板或镀镍甚至镀银、镀金的各种金属(如铝、镁、铁)板为集流板材料，在板面上可加工各种形状的气体流动通道构成集流板。

图 2.24 所示为碱性石棉膜型氢氧燃料电池中单体电池的工作原理。

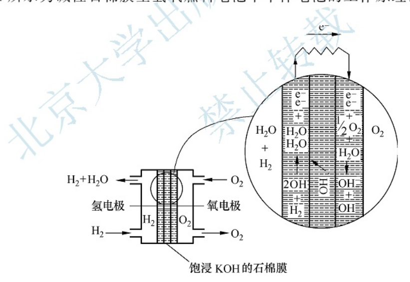


图 2.24 碱性石棉膜型氢氧燃料电池中单体电池的工作原理

在阳极，氢气与碱中的 OH^- 在电催化剂的作用下，发生氧化反应生成水和电子，电子通过外电路达到阴极，在阴极电催化剂的作用下，参与氧的还原反应，生成的 OH^- 通过饱浸碱液的多孔石棉膜迁移到氢电极。阳极和阴极发生的化学反应为

$$H_2 + 2OH^- \longrightarrow 2H_2O + 2e^-$$

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \longrightarrow 4OH^-$$

总反应为

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

2. 碱性燃料电池的特点

碱性燃料电池与其他类型燃料电池相比，具有以下特点。

(1) 碱性燃料电池具有较高的效率(50%～55%)。

(2) 工作温度约80℃，因此，它们的起动也很快，但其电力密度却比质子交换膜燃料电池的密度低十几倍。

(3) 性能可靠，可用非贵金属作催化剂。

(4) 碱性燃料电池是燃料电池中生产成本最低的一种电池。

(5) 碱性燃料电池是技术发展最快的一种电池，主要为空间任务，包括为航天飞机提供动力和饮用水，其次则是用于交通工具，具有一定的发展和应用前景。

(6) 使用具有腐蚀性的液态电解质，具有一定的危险性并容易造成环境污染。此外，为解决二氧化碳毒化所采用的一些方法，如使用循环电解液吸收二氧化碳等增加了系统的复杂性。

2.5.6 磷酸燃料电池

磷酸燃料电池是以酸为导电电解质的酸性燃料电池，是目前燃料电池中已经商业化运行的燃料电池。

1. 磷酸燃料电池的结构

磷酸燃料电池的电池片由基材及肋条板触媒层所组成的燃料极、保持磷酸的电解质层、与燃料极具有相同构造的空气极构成。在燃料极，燃料中的氢原子释放电子成为氢离子。氢离子通过电解质层，在空气极与氧离子发生反应生成水。将数枚单位电池片进行叠加，每枚单位电池片中叠加进为降低发电时内部热量的冷却板，从而构成输出功率稳定的基本电池堆，再加上用于上下固定的构件、供气用的集合管等构成磷酸燃料电池的电池堆。其结构如图2.25所示。

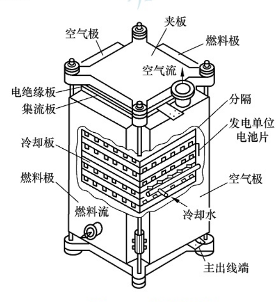


图2.25 电池堆结构

2. 磷酸燃料电池的工作原理

图 2.26 所示为磷酸燃料电池的工作原理。磷酸燃料电池使用液体磷酸为电解质，通常位于碳化硅基质中。当以氢气为燃料，氧气为氧化剂时，在电池内发生电化学反应。

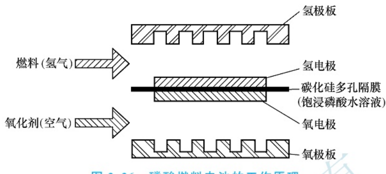


图 2.26 磷酸燃料电池的工作原理

阳极和阴极发生的化学反应为

$$H_2 \longrightarrow 2H^+ + 2e^-$$

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \longrightarrow 2H_2O$$

总反应为

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

3. 磷酸燃料电池的特点

磷酸燃料电池的工作温度要比质子交换膜燃料电池和碱性燃料电池的工作温度略高，位于 150～200℃，但仍需电极上的铂催化剂来加速反应。较高的工作温度也使其对杂质的耐受性较强，当其反应物中含有 1%～2%的一氧化碳和百万分之几的硫时，磷酸燃料电池照样可以工作。

磷酸燃料电池的效率比其他燃料电池低，约为 40%，其加热的时间也比质子交换膜燃料电池长。

磷酸燃料电池具有构造简单、稳定、电解质挥发度低等优点。磷酸燃料电池可用作公共汽车的动力，并且有许多这样的系统正在运行，不过这种电池很难用在轿车上。目前，磷酸燃料电池能成功地用于固定的应用，已有许多发电能力为 0.2～20MW 的工作装置被安装在世界各地，为医院、学校和小型电站提供动力。

2.5.7 熔融碳酸盐燃料电池

1. 熔融碳酸盐燃料电池的结构

熔融碳酸盐燃料电池是由多孔陶瓷阴极、多孔陶瓷电解质隔膜、多孔金属阳极、金属极板构成的燃料电池。

单体的熔融碳酸盐燃料电池一般是平板型的，由电极、电解质、燃料流通道、氧化剂流通道和上下隔板组成，如图 2.27 所示。其电解质是熔融态碳酸盐。

2. 熔融碳酸盐燃料电池的工作原理

熔融碳酸盐燃料电池的工作原理如图 2.28 所示。

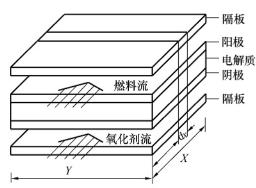


图 2.27　单体熔融碳酸盐燃料电池概念图

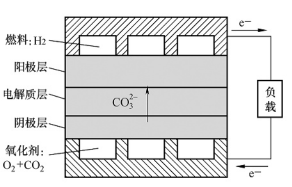


图 2.28　熔融碳酸盐燃料电池的工作原理

熔融碳酸盐燃料电池的工作过程实质上是燃料的氧化和氧化剂的还原过程。燃料和氧化剂气体流经阳极和阴极通道。氧化剂中的 O_2 和 CO_2 在阴极与电子进行氧化反应产生 CO_3^{2-}，电解质板中的 CO_3^{2-} 直接从阴极移动到阳极，燃料气体中的 H_2 与 CO_3^{2-} 在阳极发生反应，生成了 CO_2、H_2O 和电子。电子被集流板收集起来，然后到达隔板。隔板位于燃料电池单元的上部和下部，并和负载设备相连，从而构成了包括电子传输和离子移动在内的完整的回路。

其化学反应为

$$H_2(a)+CO_3^{2-} \longrightarrow H_2O(a)+CO_2(a)+2e^-(a)$$

$$2CO_2+O_2(c)+4e^-(c) \longrightarrow 2CO_3^{2-}(c)$$

$$2H_2+O_2+2CO_2(c) \longrightarrow 2H_2O+2CO_2(a)+2E^0+Q^0$$

式中，a、c 分别表示阳极、阴极；e^- 表示电子；E^0 表示基本发电量；Q^0 表示基本放热量。

3. 熔融碳酸盐燃料电池的特点

熔融碳酸盐燃料电池是一种高温电池(600～700℃)，具有效率高(高于 40%)，噪声低，无污染，燃料多样化(氢气、煤气、天然气和生物燃料等)，余热利用价值高和电池构造材料价廉等诸多优点，是未来的绿色电站。

2.5.8 固体氧化物燃料电池

固体氧化物燃料电池属于第三代燃料电池，是一种在中高温下直接将储存在燃料和氧化剂中的化学能高效、环境友好地转化为电能的全固态化学发电装置。固体氧化物燃料电池被普遍认为是在未来会与质子交换膜燃料电池一样得到广泛应用的一种燃料电池。

1. 固体氧化物燃料电池的结构

固体氧化物燃料电池单体主要由电解质、阳极(或燃料极)、阴极(或空气极)和连接体(或集流板)组成，如图 2.29 所示。

固体电解质是固体氧化物燃料电池最核心的部件。它的主要功能是传导氧离子。它的性能(包括电导率、稳定性、热膨胀系数、致密化温度等)不但直接影响电池的工作温度及转换效率，还决定了与之相匹配的电极材料及其制备技术的选择。常用的电解质材料是镍粉弥散在 YSZ(钇稳定氧化锆)的金属陶瓷，其离子电导率在氧分压变化十几个数量级时，都不发生明显变化。

电极材料本身首先是一种催化剂。阴极需要长期在高温和氧化中工作，起传递电子和扩散氧作用，应是多孔洞的电子导电性薄膜。固体氧化物燃料电池的工作温度高，只有贵金属或电子导电的氧化物适用于阴极材料，由于铂、钯等贵金属价格昂贵，一般只在实验范围内使用；实际常应用掺锶的锰酸镧作为固体氧化物燃料电池的阴极材料。Ni/YSZ陶瓷合金造价最低，是实际应用中首选的阳极材料。



图 2.29 固体氧化物燃料电池的基本组成

连接体在单体电池间起连接作用，并将阳极侧的燃料气体与阴极侧的氧化气体(氧气或空气)隔离开来。钙钛矿结构的铬酸镧常用作固体氧化物燃料电池的连接体材料。

2. 固体氧化物燃料电池的工作原理

固体氧化物燃料电池工作时，电子由阳极经外电路流向阴极，氧离子经电解质由阴极流向阳极。图 2.30 所示为固体氧化物燃料电池的工作原理。

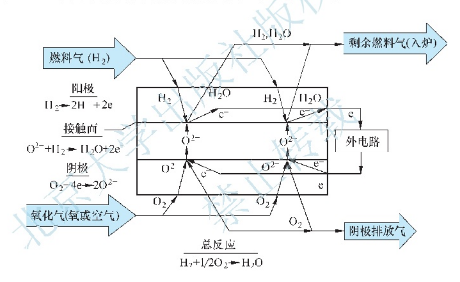


图 2.30 固体氧化物燃料电池的工作原理

阴极发生氧化剂(氧或空气)的电还原反应，即氧分子得到电子被还原为氧离子。阴极的化学反应为

$$O_2 + 4e^- \longrightarrow 2O^{2-}$$

氧离子在电解质隔膜两侧电位差与浓差驱动力的作用下，通过电解质隔膜中的氧空位，定向跃迁到阳极侧。

在阳极发生燃料(氢或富氢气体)的电氧化反应，即燃料(如氢)与经电解质传递过来的氧离子进行氧化反应生成水，同时向外电路释放电子，电子通过外电路到达阴极形成直流电。

分别用 H_2、CO、CH_4 作燃料时，阳极的化学反应为

$$H_2 + O^{2-} \longrightarrow H_2O + 2e^-$$

$$CO + O^{2-} \longrightarrow CO_2 + 2e^-$$

$$CH_4 + 4O^{2-} \longrightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$$

以 H_2 为例，电池的总反应为

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

3. 固体氧化物燃料电池的特点

(1) 固体氧化物燃料电池的优点

固体氧化物燃料电池除具备燃料电池高效、清洁、环境友好的共性外，还具有以下优点。

① 固体氧化物燃料电池是全固态的电池结构，不存在电解质渗漏问题，避免了使用液态电解质所带来的腐蚀和电解液流失等问题，无需配置电解质管理系统，可实现长寿命运行。

② 对燃料的适应性强，可直接用天然气、煤气和其他碳氢化合物作为燃料。

③ 固体氧化物燃料电池直接将化学能转化为电能，不通过热机过程，因此不受卡诺循环的限制。发电效率高，能量密度大，能量转换效率高。

④ 工作温度高，电极反应速度快，不需要使用贵金属作电催化剂。

⑤ 可使用高温进行内部燃料重整，使系统优化。

⑥ 低排放、低噪声。

⑦ 废热的再利用价值高。

⑧ 陶瓷电解质要求中、高温运行(600～1000℃)，加快了电池的反应进程，还可以实现多种碳氢燃料气体的内部还原，简化了设备。

(2) 固体氧化物燃料电池的缺点

① 氧化物电解质材料为陶瓷材料，质脆易裂，电池堆组装较困难。

② 高温热应力作用会引起电池龟裂，所以主要部件的热膨胀率应严格匹配。

③ 存在自由能损失。

④ 工作温度高，预热时间较长，不适用于需经常起动的非固定场所。

早期开发出来的固体氧化物燃料电池的工作温度较高，一般在 800～1000℃。目前科学家已经研发成功中温固体氧化物燃料电池，其工作温度一般在 800℃左右。一些国家的科学家也正在努力开发低温固体氧化物燃料电池，其工作温度更可以降低至 650～700℃。工作温度的进一步降低，使得固体氧化物燃料电池的实际应用成为可能。

单体电池只能产生 1V 左右电压，功率有限，为了使固体氧化物燃料电池具有实际应用可能，需要大大提高固体氧化物燃料电池的功率。为此，可以将若干个单电池以各种方式(串联、并联、混联)组装成电池组。目前固体氧化物燃料电池组的结构主要有管状、平板型和整体型三种，其中平板型因功率密度高和制作成本低而成为固体氧化物燃料电池的发展趋势。

固体氧化物燃料电池的能量密度高、燃料范围广和结构简单等优点是其他燃料电池无法比拟的。随着固体氧化物燃料电池的生产成本和操作温度进一步降低，能量密度的增加和起动时间进一步缩短，可以预见，固体氧化物燃料电池在今后的燃料电池电动汽车发展中有比较广阔的发展前景。

2.5.9 直接甲醇燃料电池

直接甲醇燃料电池属于质子交换膜燃料电池的一类，是直接用水溶液及蒸气甲醇作为燃料供给来源，而不需通过重整器重整甲醇、汽油及天然气等取出氢以供发电。

1. 直接甲醇燃料电池的结构与原理

直接甲醇燃料电池(图2.31)主要由阳极、固体电解质膜和阴极构成。阳极和阴极分别由多孔结构的扩散层和催化剂层组成，通常使用不同疏水性、亲水性的炭黑和聚四氟乙烯作为直接甲醇燃料电池的阳极和阴极材料。

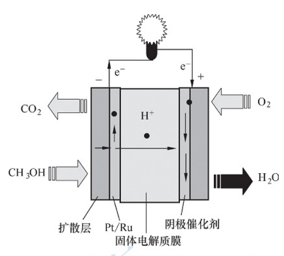


图2.31 直接甲醇燃料电池的结构与原理示意图

以甲醇为燃料，将甲醇和水混合物送至直接甲醇燃料电池阳极，在阳极甲醇直接发生电催化氧化反应生成CO_2，并释放出电子和质子。阴极氧气发生电催化还原反应，与阳极产生的质子反应生成水。电子从阳极经外电路转移至阴极形成直流电，工作温度为25～135℃。

阳极和阴极发生的化学反应为

$$CH_3OH + H_2O \longrightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$$

$$3O_2 + 12e^- + 6H_2O \longrightarrow 12OH^-$$

总反应为

$$CH_3OH + 3/2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O$$

2. 直接甲醇燃料电池的特点

直接甲醇燃料电池的突出特点如下。

(1) 甲醇来源丰富，价格低廉，储存、携带方便。

(2) 与氢氧质子交换膜燃料电池相比，结构更简单，操作更方便。

(3) 与质子交换膜燃料电池相比，体积能量密度更高。

(4) 与重整式甲醇燃料电池相比，它没有甲醇重整装置，质量更轻，体积更小，响应时间更短。

直接甲醇燃料电池的缺点是当甲醇低温转换为氢和二氧化碳时要比常规的质子交换膜燃料电池需要更多的铂催化剂。

直接甲醇燃料电池使用的技术仍处于其发展的早期，但已成功地显示出可以用作移动电话和便携式计算机的电源，将来可能成为可携式电子产品和交通工具用电源的主流。

2.5.10 微生物燃料电池

微生物燃料电池是利用电池的阳极来代替氧或硝酸盐等天然的电子受体，通过电子的不断转移来产生电能。微生物氧化燃料所生成的电子通过细胞膜相关联组分或者通过氧化还原介体传递给阳极，再经过外电路转移到阴极，在阴极区电子将电子受体(如氧)还原，然后与透过质子交换膜转移过来的质子结合生成水。

微生物燃料电池本质上是收获微生物代谢过程中生成的电子并引导电子产生电流的系统。微生物燃料电池的功率输出取决于系统传递电子的数量和速率，以及阳极与阴极间的电位差。由于微生物燃料电池并非一个热机系统，避免了卡诺循环的热力学限制，因此理论上微生物燃料电池是将化学能转化为电能最有效的装置，最大效率有可能接近100%。

与其他燃料电池相比，微生物燃料电池在温度(常温)、电极(不需贵金属电极)、燃料

(不需纯化)等方面具有优势。虽然单个微生物燃料电池的工作电压只有0.15V左右，但许多个微生物燃料电池堆叠就可产生较高的电压，满足对低电压用电的需求。

微生物燃料电池作为一种可再生的清洁能源技术的研究正在国内外迅速兴起，势必将得到不断的推广和应用，为节能减排、治理污染做出重要的贡献。

2.5.11 再生型燃料电池

再生型燃料电池由电解池和燃料电池组成，向日时，太阳能发电并电解水，生成氢气与氧气并储存起来；背日时，燃料电池发电，生成水，水可以循环使用，并保持储能基本恒定。再生型燃料电池具有高的比能量和比功率，使用中无自放电，并且无放电深度及电池容量的限制。

再生型燃料电池的概念相对较新，但全球有许多研究小组正在从事这方面的工作。这一技术与普通燃料电池的相同之处在于它也用氢和氧来生成电、热和水。其不同的地方是它还进行逆反应，也就是电解。燃料电池中生成的水再送回到以太阳能为动力的电解池中，并分解为氢和氧组分，然后这种组分被送回燃料电池。这种方法就构成了一个封闭的系统，不需要外部生成氢。

美国等发达国家非常重视再生型燃料电池技术的研究开发，已经把再生型燃料电池技术应用于航空航天领域，并将再生型燃料电池技术视为今后“空间可再生能源技术”的重要发展方向之一。德国、日本等国家在再生型燃料电池领域也有一定规模的研究。

2.6 太阳电池

太阳电池是利用太阳光和材料相互作用直接产生电能的，是对环境无污染的可再生能源。它的应用可以解决人类社会发展在能源需求方面的问题。太阳能是一种储量极其丰富的洁净能源，太阳每年向地面输送的能量高达3×10^{24}J，相当于世界年耗能量的1.5万倍。因此太阳电池是人们利用可持续的太阳能资源，解决世界范围内的能源危机和环境问题的一条重要途径。

2.6.1 太阳电池的分类

1. 按不同材料分类

太阳电池按照材料不同，主要有硅系列太阳电池和化合物系列太阳电池。

(1) 硅系列太阳电池。硅系列太阳电池是以硅材料为基体的太阳电池，分为单晶硅太阳电池、多晶硅薄膜太阳电池和非晶硅薄膜太阳电池等。

(2) 化合物系列太阳电池。多元化合物薄膜太阳电池材料为无机盐，主要包括砷化镓薄膜太阳电池、硫化镉薄膜太阳电池、碲化镉薄膜太阳电池及铜铟硒薄膜太阳电池等。

2. 按结构分类

太阳电池按照结构不同，可以分为同质结电池、异质结电池、肖特基结电池、光电化学电池等。

(1) 同质结电池：由同一种半导体材料构成一个或多个PN结的电池，如硅太阳电池、

砷化镓太阳电池等。

(2) 异质结电池：用两种不同的半导体材料，在相接的界面上构成一个异质结的太阳电池，如氧化铟锡/硅电池、硫化亚铜/硫化镉电池等。如果两种异质材料晶格结构相近，界面处的晶格匹配较好，则称为异质面电池，如砷化铝镓/砷化镓电池。

(3) 肖特基结电池：用金属和半导体接触组成一个“肖特基势垒”的电池，也称MS电池，已发展成金属-氧化物-半导体电池和金属-绝缘体-半导体电池，这些总称为导体-绝缘体-半导体电池。

(4) 光电化学电池：用浸于电解质中的半导体电极构成的电池，又称液结电池。

2.6.2 太阳电池的特点

单晶硅太阳电池的转换效率(15%～17%)最高，技术也最成熟。在大规模应用和工业生产中仍占据主导地位，但由于单晶硅价格高，大幅度降低其成本很困难，为了节省硅材料，发展了多晶硅薄膜和非晶硅薄膜作为单晶硅太阳电池的替代产品。

多晶硅薄膜太阳电池与单晶硅太阳电池相比，成本低，而效率高于非晶硅薄膜太阳电池，其转换效率为12%～14%。因此，多晶硅薄膜太阳电池将会在太阳电池市场占据主导地位。

非晶硅薄膜太阳电池成本低，质量轻，转换效率为6%～10%，便于大规模生产，有极大的潜力，但受制于其材料引发的光致衰退效应，稳定性不高，直接影响了它的实际应用。如果能进一步解决稳定性问题及提高转换率问题，那么非晶硅薄膜太阳电池无疑是太阳电池的主要发展产品之一。

硫化镉薄膜太阳电池、碲化镉薄膜太阳电池的转换效率较非晶硅薄膜太阳电池的转换效率高，成本较单晶硅太阳电池低，并且也易于大规模生产，但镉有剧毒，会对环境造成严重的污染，因此并不是晶体硅太阳电池最理想的替代产品。

砷化镓薄膜太阳电池的转换效率可达28%。砷化镓化合物材料具有十分理想的光学带隙及较高的吸收效率，抗辐照能力强，对热不敏感，适合于制造高效单结电池。但是砷化镓材料的价格不菲，因而在很大程度上限制了砷化镓薄膜太阳电池的普及。

铜铟硒薄膜太阳电池适合光电转换，不存在光衰退问题，转换效率和多晶硅一样，具有价格低廉、性能良好和工艺简单等优点，将成为今后发展太阳电池的一个重要方向。唯一的问题是材料的来源，由于铟和硒都是比较稀有的元素，因此，这类电池的发展又必然受到限制。

2.6.3 太阳电池的发电原理

太阳电池的发电原理是基于半导体的光生伏特效应将太阳辐射能直接转化为电能。在晶体中电子的数目总是与核电荷数相一致，所以P型硅和N型硅是电中性的。如果将P型硅或N型硅放在阳光下照射，光的能量通过电子从化学键中释放，由此产生电子-空穴对，但在很短的时间内(在微秒范围内)电子又被捕获，即电子和空穴“复合”。



【硅太阳电池的发电原理】

当P型材料和N型材料相接，将在晶体中P型材料和N型材料之间形成界面，即PN结。此时在界面层N型材料中的自由电子和P型材料中的空穴相对应。由于正负电荷之间的吸引力，在界面层附近N型材料中的电子扩散到P型材料中，而空穴扩散到N型材料中与自由电子复合。这样在界面层周围形成一个无电荷区域。通过界面层周围的电荷交换

形成两个带电区，即通过电子到P型材料的迁移在N型区形成一个正的空间电荷区和在P型区形成一个负的空间电荷区。

对不同材料的太阳电池，尽管光谱响应的范围是不同的，但光电转换的原理是一致的。如图2.32所示，在PN结的内静电场作用下，N型区的空穴向P型区运动，而P型区的电子向N型区运动，最后造成在太阳电池受光面(上表面)有大量负电荷(电子)积累，而在电池背光面(下表面)有大量正电荷(空穴)积累。如在电池上、下表面引出金属电极，并用导线连接负载，在负载上就有电流通过。只要太阳光照不断，负载上就一直有电流通过。

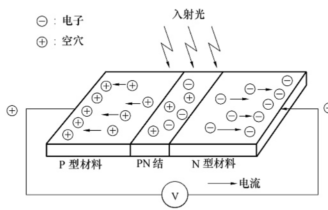


图2.32　硅太阳电池的发电原理

2.6.4　太阳电池的伏安特性

太阳电池经光照射后可以发电并带动负荷，表征光伏发电的特性称为伏安特性。

如果在太阳电池两端接上一个负载电阻 R，那么太阳电池在工作状态下的等效电路如图2.33所示。它相当于一个恒流源与一只正向二极管并联，流过二极管的电流在太阳电池中称为暗电流，这是理想太阳电池的等效电路。

图2.33　太阳电池在工作状态下的等效电路

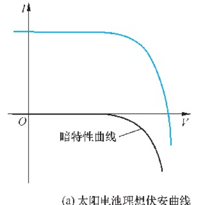
太阳电池的理想伏安特性为

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0\left(e^{\frac{qV}{KT}} - 1\right) \qquad (2-17)$$

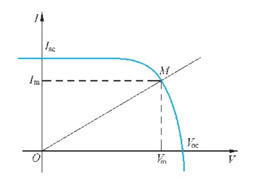
式中，I 为流过负载的电流；I_{ph} 为光电流；I_D 为暗电流；I_0 为二极管饱和电流；q 为电荷电量；V 为二极管的端电压；K 为玻耳兹曼常数；T 为绝对温度。

光照下硅太阳电池的特性参数有短路电流、开路电压、填充因子和效率。

太阳电池理想伏安曲线如图2.34(a)所示。图中还画出了暗特性曲线，即无光照时的伏安曲线。太阳电池的负载特性曲线如图2.34(b)所示，曲线上的点称为工作点，随负载



(a) 太阳电池理想伏安曲线



(b) 太阳电池的负载特性曲线

图2.34　太阳电池伏安曲线

变化而变化。如果太阳电池电路短路，即 $V=0$，此时的电流为短路电流，用 I_{sc} 表示；如果电路开路，即 $I=0$，此时的电压为开路电压，用 V_{oc} 表示。

由式(2-17)可得

$$I_{sc}=I_{ph}$$
$$V_{oc}=\frac{KT}{q}\ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}+1\right) \tag{2-18}$$

调节负载电阻到某一值 R_m 时，曲线上有一点 M 满足输出功率 P 最大，称为最大功率点。该点所对应的电流称为最大功率点电流 I_m，所对应的电压称为最大功率点电压 V_m，所对应的功率则称为最大功率 P_m。

$$P_m=I_mV_m \tag{2-19}$$

定义填充因子 FF 为太阳电池最大功率与开路电压和短路电流乘积的比值。

$$\mathrm{FF}=\frac{P_m}{V_{oc}\times I_{sc}} \tag{2-20}$$

填充因子是评价太阳电池输出特性好坏的一个重要参数，它的值越高，表明太阳电池输出特性越趋近于矩形，太阳电池性能越好。硅太阳电池的填充因子值为0.7～0.85。

P_m 可以表示为

$$P_m=V_{oc}\times I_{sc}\times \mathrm{FF} \tag{2-21}$$

因此，在一定的光照下，为了有尽量大的功率输出，就要获得尽量大的开路电压、短路电流和填充因子。

电池的最大功率点的输出功率与入射光功率之比称为光电转换效率。

$$\eta=\frac{P_m}{P_{in}}\times 100\%=\frac{V_{oc}\times I_{sc}\times \mathrm{FF}}{P_{in}}\times 100\% \tag{2-22}$$

式中，P_{in} 为太阳辐射(入射光)功率。

由式(2-22)可知，影响太阳电池转换效率的参数有开路电压、短路电流和填充因子。但开路电压、填充因子受暗电流影响很大，因此，太阳电池的转换效率主要取决于其暗电流特性和短路电流的大小。

对于实际太阳电池，影响转换效率的主要因素：①串联电阻，主要包括正面金属电极与半导体材料的接触电阻、半导体材料的体电阻和电极电阻三部分；②并联电阻，主要是电池边缘漏电或耗尽区内的复合电流引起的。

2.7 其他动力电池

2.7.1 镍镉蓄电池

镍镉蓄电池是一种碱性蓄电池，比能量可达 55W·h/kg，比功率超过 190W/kg，可快速充电，循环使用寿命较长，可达到 2000 次以上，使用中要注意做好回收工作，以免重金属镉造成环境污染。

镍镉蓄电池的结构与工作原理和镍氢蓄电池相似。

1. 镍镉蓄电池的结构

镍镉蓄电池正极板上的活性物质由氧化镍粉和石墨粉组成，石墨不参加化学反应，其主要作用是增强导电性。

负极板上的活性物质由氧化镉粉和氧化铁粉组成。氧化铁粉的作用是使氧化镉粉有较高的扩散性，防止结块，并增加极板的容量。活性物质分别包在穿孔钢带中，加压成型后即成为电池的正负极板。极板间用耐碱的硬橡胶绝缘棍或有孔的聚氯乙烯瓦楞板隔开。

电解液通常为氢氧化钠或氢氧化钾溶液。当环境温度较高时，使用相对密度为1.17～1.19(15℃时)的氢氧化钠溶液。当环境温度较低时，使用相对密度为1.19～1.21(15℃时)的氢氧化钾溶液。在－15℃以下时，使用相对密度为1.25～1.27(15℃时)的氢氧化钾溶液。为兼顾低温性能和荷电保持能力，密封镍镉蓄电池采用相对密度为1.40(15℃时)的氢氧化钾溶液。为了增加蓄电池的容量和循环寿命，通常在电解液中加入少量的氢氧化锂(每升电解液加15～20g)。

2. 镍镉蓄电池充放电时的化学反应

镍镉蓄电池放电时负极和正极发生的化学反应为

$$Cd-2e^-+2OH^- \longrightarrow Cd(OH)_2$$

$$NiOOH+H_2O+e^- \longrightarrow Ni(OH)_2+OH^-$$

总反应为

$$2NiOOH+2H_2O+Cd \longrightarrow 2Ni(OH)_2+Cd(OH)_2$$

镍镉蓄电池充电时阴极和阳极发生的化学反应为

$$Ni(OH)_2-e^-+OH^- \longrightarrow NiOOH+H_2O$$

$$Cd(OH)_2+2e^- \longrightarrow Cd+2OH^-$$

总反应为

$$2Ni(OH)_2+Cd(OH)_2 \longrightarrow 2NiOOH+Cd+2H_2O$$

与其他电池相比，镍镉蓄电池的自放电率适中。镍镉蓄电池在使用过程中，如果放电不完全就又充电，下次再放电时，就不能放出全部电量。例如，放出80%电量后再充足电，该电池只能放出80%的电量。这就是所谓的记忆效应。当然，几次完整的放电—充电循环将使镍镉蓄电池恢复正常工作。由于镍镉蓄电池的记忆效应，若未完全放电，应在充电前将每节电池放电至1V以下。

3. 镍镉蓄电池的容量

镍镉蓄电池的容量与活性物质的数量、放电率和电解液等因素有关。

放电电流直接影响放电终止电压。在规定的放电终止电压下，放电电流越大，蓄电池的容量越小。

使用不同成分的电解液，对蓄电池的容量和寿命有一定的影响。通常，在高温环境下，为了提高蓄电池的容量，常在电解液中添加少量氢氧化锂，组成混合溶液。实验证明：每升电解液中加入15～20g含水氢氧化锂，在常温下，蓄电池的容量可提高4%～5%，在40℃时，蓄电池的容量可提高20%。然而，电解液中锂离子的含量过多，不仅使电解液的电阻增大，还会使残留在正极板上的锂离子慢慢渗入晶格内部，对正极的化学变

化产生有害影响。

电解液的温度对蓄电池的容量影响较大。这是因为随着电解液温度的升高，极板活性物质的化学反应逐步改善。

电解液中的有害杂质越多，蓄电池的容量越小。电解液中的主要有害杂质是碳酸盐和硫酸盐。它们能使电解液的电阻增大，并且低温时容易结晶，堵塞极板微孔，使蓄电池的容量显著下降。此外，碳酸根离子还能与负极板上的活性物质反应，生成碳酸镉附着在负极板表面，从而引起导电不良，使蓄电池内阻增大，容量下降。

在正常使用条件下，镍镉蓄电池的容量效率为67%～75%，电能效率为55%～65%，循环寿命约为2000次。

2.7.2 锌镍蓄电池

锌镍蓄电池由镍电极和锌电极组成，兼有镍镉蓄电池中镍正极长寿命和锌银蓄电池中锌负极高容量的优越性能，是一种高性能绿色二次动力电池。

1. 锌镍蓄电池的结构

锌镍蓄电池的正极为镍电极，负极为锌电极；锌电极外包裹多层隔膜，隔膜一般为无纺布(常用的有聚丙烯和聚酰胺两种)，分为储存电解液的吸液隔膜和防止锌枝晶穿透的隔膜；电极以极耳引出。除了这些基本组成单元之外，锌镍蓄电池的组成还包含电解液、气阀、辅助电极和电池容器等。

(1) 镍电极。镍电极采用$Ni(OH)_2$作为活性材料。根据所用的基底和制备方法不同，镍电极可以分为非烧结型镍电极、烧结型镍电极和电化学沉积轻质镍电极。前两种类型是目前主要使用的镍电极。烧结型镍电极较传统，而要得到高容量、高活性的正极，一般采用非烧结型镍电极，即以高孔隙率的泡沫镍或纤维镍材料作为骨架，填涂高密度的球形氢氧化镍。电化学沉积轻质镍电极应用不多。

(2) 锌电极。锌电极的主要活性物质为氧化锌。锌电极由氧化锌、金属锌粉、改善电极性能的导电剂、少量的添加剂和聚四氟乙烯乳液等混合压制而成。锌电极的主要制备方法有压成法、涂膏法、烧结法、电沉积法及化成法等。在各种锌电池中，锌电极一般采用多孔电极形式。锌电极在循环过程会不断地溶解，从而造成锌电极的形变、钝化、枝晶等问题，所以在锌电极中必须添加大量的添加剂以抑制这些问题的出现。

(3) 隔膜。隔膜置于电池的正负极之间，防止正负极活性材料直接接触造成电池内部短路。隔膜的性能是影响蓄电池电性能和机械性能的主要因素，因此对锌镍蓄电池的隔膜有很高的要求，除了要能抗锌枝晶穿透外，还要能耐强碱、抗氧化、易被电解液润湿、具有好的机械强度和充分的柔韧性、低电阻和高离子导电性。这些要求在单一隔膜上都具备很困难，因此锌镍蓄电池都是将多种隔膜组合使用，常用的隔膜为尼龙无纺布和聚丙烯毡。

(4) 电解液。锌镍蓄电池的电解液一般采用6mol/L的氢氧化钾水溶液。在长期使用过程中，蓄电池的$Ni(OH)_2$晶粒会逐渐聚结而造成充电困难，因此实际生产中的电解液通常添加适量的氢氧化锂水溶液，一般为0.6mol/L。

2. 锌镍蓄电池的电化学反应机理

锌镍蓄电池使用 $Ni(OH)_2/NiOOH$ 作为正极，ZnO/Zn 作为负极，氢氧化钾水溶液作为电解液。放电时，金属 Zn 被氧化为 ZnO，NiOOH 还原为 $Ni(OH)_2$，充电时反之。

锌镍蓄电池放电时负极和正极发生的化学反应为

$$Zn + 2OH^- \longrightarrow ZnO + H_2O + 2e^-$$

$$NiOOH + H_2O + e^- \longrightarrow Ni(OH)_2 + OH^-$$

总反应为

$$Zn + 2NiOOH + H_2O \longrightarrow ZnO + 2Ni(OH)_2$$

锌镍蓄电池的理论开路电压是 1.3V，其中负极电位−1.24V，正极电位 0.49V。氢氧化钾水溶液在电池电化学反应中不仅起离子迁移电荷作用，而且 H_2O 与 OH^- 在充放电过程中参与了电极反应。

若蓄电池过充电，阳极产生 O_2，阴极生成 H_2，这些气体可能会结合形成水。阴极和阳极发生的化学反应为

$$2H_2O + 2e^- \longrightarrow H_2 + 2OH^-$$

$$2OH^- \longrightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^-$$

总反应为

$$H_2O \longrightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$$

过充电时在阳极产生的 O_2 也可能在阴极直接与金属锌结合生成氧化锌。H_2 和 O_2 的产生增加了蓄电池内压，使蓄电池密封困难。过充电时，阳极产生 O_2，阴极生成 H_2，这两个反应的发生取决于阴阳极上活性材料的数量和它们的利用率。

3. 锌镍蓄电池的特点

锌镍蓄电池具有以下优点。

(1) 比能量高，可达 50～80W·h/kg，明显高于铅酸蓄电池和镍镉蓄电池。

(2) 比功率高，仅次于锂离子蓄电池。

(3) 工作电压高，可达 1.65V，高于镍氢蓄电池和镍镉蓄电池。

(4) 工作温度宽，为−20～60℃。

(5) 无记忆效应。

(6) 蓄电池的生产和使用过程对环境不产生污染。

(7) 价格低。

锌镍蓄电池的寿命问题一直是商品化的重大障碍，因此延长锌镍蓄电池的寿命是解决问题的关键。据报道，由于采用一种新的锌电极化学体系，在放电深度为 80%时，锌镍蓄电池的循环寿命达到了 600～1000 次。据此认为锌镍蓄电池系列将是电动汽车应用有力的竞争者。影响锌镍蓄电池寿命的因素有三个方面：锌电极的变形和锌枝晶的产生，隔膜的氧化和穿透，镍电极的毒化。

表 2-5 列出了锌镍蓄电池和其他动力电池主要性能的比较。从表中对比可以发现锌镍蓄电池的显著优势。锌镍蓄电池这一绿色电源，将成为其他动力电池的有力竞争者，在汽车动力电源和手提式电子仪器方面展示出了广阔的应用前景。

表 2-5 锌镍蓄电池和其他动力电池主要性能的比较

电池种类	工作电压/V	比能量/(W·h/kg)	比功率/(W/kg)	循环寿命/次	存在问题
锌镍蓄电池	1.2～1.6	50～80	500	200～300	循环寿命短
铅酸蓄电池	1.5～1.8	25～35	50～200	250～450	体积大、比能量低、循环寿命短、容易腐蚀、环保性能差
镍镉蓄电池	1.0～1.2	30～45	500	500	记忆效应，镉对环境有害，高温充电性能差
镍氢蓄电池	1.2	60～70	100～200	500	价格高，高温充电性能差
锂离子蓄电池	3.6	120～150	>800	800	价格高，存在安全性问题

2.7.3 空气电池

金属空气电池是用金属燃料代替氢能源而形成的一种新概念电池，有望成为新一代绿色能源。它具备燃料电池的众多优点，将锌、铝等金属像氢气一样置于电池中的反应位置，与氧气一起构成一个连续的电能产生装置，并具有无毒、无污染、放电电压平稳、比能量高、内阻小、储存寿命长、价格相对较低、工艺技术要求较低、比功率高等优点。这种电池既有丰富的廉价资源，又可再生利用，而且比氢燃料电池结构简单，很有发展和应用前景。

1. 锌空气电池

锌空气电池是以空气中的氧气为正极活性物质，金属锌为负极活性物质的一种新型化学电源。锌空气电池是一种半蓄电池半燃料电池。首先，负极活性物质同锌锰、铅酸等蓄电池一样封装在电池内部，具有蓄电池的特点；其次，正极活性物质来自电池外部的空气中所含的氧，理论上有无限容量，是燃料电池的典型特征。

锌空气电池可以表达为

$$(-)Zn|KOH|O_2(空气)(+)$$

锌空气电池放电时负极和正极发生的化学反应为

$$Zn+2OH^- \longrightarrow ZnO+H_2O+2e^-$$

$$O_2+2H_2O+4e^- \longrightarrow 4OH^-$$

总学反应为

$$2Zn+O_2 \longrightarrow 2ZnO$$

(1) 锌空气电池的优点。

① 比能量高。由于正极活性物质来自电池的外部，无须占用电池的空间，在相同体积、质量的情况下，锌空气电池内可以装入更多的负极活性物质，使得锌空气电池比普通电池的容量高出很多，其理论比能量在1350W·h/kg以上，实际比能量在1000W·h/kg以上，属于大容量高能化学电源。

表 2-6 是几种电池比能量的比较。

表 2-6　几种电池比能量的比较

电池种类	比能量/(W·h/kg)	能量密度/(W·h/L)
铅酸蓄电池	35	79
镍氢蓄电池	50	160
镍镉蓄电池	35	80
锂离子蓄电池	90	200
锌空气电池	340	1050

② 价格低廉。负极活性物质锌来源丰富，价格便宜。正极活性物质氧气来源于周围空气，基本等同于现在普通使用的铅酸蓄电池。

③ 性能稳定，放电平稳。因放电时负极催化剂本身不起变化，加之负极电压稳定，故放电时电压变化很小。

④ 储存特性极佳。锌空气电池实际上属于储备型电池。因为在储存过程均采用密封措施，将电池的空气孔与外界空气隔离，因而电池的容量损失极小，每年小于 2%。

⑤ 安全可靠，无污染。从生产到使用，从新产品到废品回收，都不会污染环境，更不会燃烧爆炸，堪称绿色能源。

(2) 锌空气电池的缺点。由于锌空气电池采用多孔气体电极，而且正极活性物质氧气来源于周围空气，使得电极工作时暴露于空气中，电池的这一固有特点，对电池的使用寿命与性能产生很大的危害，主要有以下几点。

① 电解液存在水分的蒸发或吸潮问题。由于正极露于空气中，必然会发生电解液水分的蒸发和吸潮问题，这将改变电解液的性能，从而使电池性能下降。

② 负极的直接氧化。由于正极中的氧直接进入电池溶于电解液，在反应过程中形成 H_2O，如果形成的 H_2O 未分解，会在正极周围积累，使正极电位负移，则负极直接氧化，从而负极出现钝化，降低了负极的活性。

③ 锌枝晶的生长。由于负极本身的自放电反应，会使锌腐蚀产生锌枝晶，当锌枝晶生长到一定程度时，会刺穿电池隔膜，使电池发生短路，降低电池性能。

④ 电解液碳酸化。在空气中的氧进入电池的同时，空气中的二氧化碳也进入电池，溶于电解液中，使得电解液碳酸化，导致电解液的导电性能下降，电池内阻增大，同时碳酸盐在正极上的析出使正极的性能下降，不仅影响了电池的放电性能，而且使电池的使用寿命受到很大影响。

⑤ 正极催化剂活性偏低。选择正极催化剂，改善正极的极化特征，提高电池的工作电压及开路电压，是非常重要的。过去正极采用铂、铑、银等贵金属作催化剂，催化效果比较好，但是这使得电池的成本很高，电池很难商品化。后来采用别的催化剂，如炭黑、石墨与二氧化锰的混合物，锌空气电池的成本降低了，但是催化剂活性偏低，影响电池的充放电电流密度。

此外，锌空气电池还有工作温度范围不宽、间歇放电性能差、容易漏液爬碱、电池及其附属设施的结构复杂且电池的抗振性能较差等问题，这些都是锌空气电池大量应用的障碍，因此，发展锌空气电池，需要排除这些不利因素。

2. 铝空气电池

铝空气电池是用高纯铝或铝合金作负极，用空气(氧)电极作正极，用碱或盐作电解液。在放电过程中高纯铝或铝合金溶解，空气中的氧被还原而释放出电能。

铝空气电池可以表达为

$$(-)Al|电解液|O_2(空气)(+)$$

铝空气电池放电时负极的化学反应为

$$Al-3e^- \longrightarrow Al^{3+}$$

$$Al^{3+}+3OH^- \longrightarrow Al(OH)_3 \quad (中性溶液)$$

$$Al^{3+}+4OH^- \longrightarrow Al(OH)_4^- \quad (碱性溶液)$$

正极的化学反应为

$$O_2+2H_2O+4e^- \longrightarrow 4OH^-$$

铝空气电池的总反应为

$$4Al+3O_2+6H_2O \longrightarrow 4Al(OH)_3 \quad (中性溶液)$$

$$4Al+3O_2+4OH^-+6H_2O \longrightarrow 4Al(OH)_4^- \quad (碱性溶液)$$

另外，铝在两种条件下都存在腐蚀反应

$$2Al+6H_2O \longrightarrow 2Al(OH)_3+3H_2$$

铝空气电池具有如下优越性。

(1) 铝是一种活泼金属，比锌、镁之类的金属更有吸引力。铝的电化学当量很高，为2980A·h/kg，是除锂之外比能量最高的金属，铝空气电池的比能量实际可达到450W·h/kg，比能量密度小于铅酸蓄电池，比功率为50～200W/kg，使用寿命达3～4年。因此，对铝的化学电源的研究和开发具有诱人的前景。铝反应时每个原子释放3个电子，而锌、镁仅释放2个，锂释放1个。也就是说要产生相同数量的能量所需要的原料量，铝的最少。因此综合众多因素，铝是金属空气电池阳极材料的最佳选择。

(2) 铝空气电池的正极活性物质来源于空气中的氧气，其正极是一种透气、不透液、能导电、有催化活性的薄膜，而且在整个电池中所占的比例很小，余下的空间可以用来充填负极材料。因此在现有的小型电池系统中具有非常高的比能量。铝空气电池的正极很薄，使得电池很轻巧，适用于便携式设备。

(3) 铝空气电池可携带燃料长距离行驶，节约能源，元件可快速更换，是电动自行车的理想电源。另外，该电池用在电动自行车上，无毒、无有害气体，可减小因燃油和燃气带来的噪声和排放，对保护环境有利。

(4) 安全可靠，无污染，从生产到使用，从新产品到废品回收，都不会污染环境，更不会燃烧爆炸，堪称绿色能源。

(5) 铝的储量丰富，价格便宜。铝是地球上含量最丰富的金属元素，在元素分布上居第三位，全球铝工业储量已超过250亿吨。铝是世界上产量最大，应用最广的金属。

(6) 铝空气电池无需充电，补充铝电极和电解液后即可产生电流。放电曲线平稳，放电时间长，操作方便。

(7) 铝电极的生产工艺和设备比较简单，投资少，研制费用低。可设计成电解液循环和不循环两种结构形式，便于因使用场合不同而进行设计。

虽然铝空气电池的比能量高，但其比功率较低，充电和放电速度比较缓慢，电压滞后，自放电率较大，需要采用热管理系统来防止铝空气电池工作时的过热。

2.7.4 铁电池

目前国内外研究的铁电池有高铁电池和锂铁电池两种。

1. 高铁电池的特点

高铁电池是以合成稳定的高铁酸盐(K_2FeO_4、$BaFeO_4$ 等)作为高铁电池的正极材料，来制作能量密度大、体积小、质量轻、使用寿命长、无污染的新型化学电池。与普通蓄电池相比，高铁电池具有以下优点。

(1) 高能高容量。目前市场上普通电池的比功率只有 60～135W/kg，而高铁电池的比功率可以达到 1000W/kg 以上，放电电流是普通电池的 3～10 倍，特别适用于需要大功率、大电流的场合。

(2) 性价比高。碱锰电池不能满足目前需大电流大容量用电的数码照相机、摄影机等电子产品的需要，锂离子蓄电池因成本高在此方面不具很强的竞争力，可以采用高铁电池。

(3) 放电曲线平坦。如 $Zn-K_2FeO_4$，70%以上的放电时间在 1.2～1.5V。

(4) 原料丰富。地壳中最丰富的金属元素为铝和铁，铁含量为 4.75%，锰的含量为 0.088%；铁的用量在自身非常丰富的情况下，仅是锰的 1/3，大大节约了社会资源，降低了原料的成本。

(5) 绿色无污染。高铁酸盐放电后的产物为 FeOOH 或 $Fe_2O_2-H_2O$，无毒、无污染，不需要回收。

2. 锂铁电池的特点

锂铁电池主要是磷酸铁电池，开路电压在 1.78～1.83V，工作电压在 1.2～1.5V，比其他一次电池高 0.2～0.4V，而且放电平稳、无污染、安全、性能优良。

磷酸铁锂电池具有以下特点。

(1) 高效率输出。标准放电为(2～5)C、连续高电流放电可达 10C，瞬间脉冲放电(10s)可达 20C。

(2) 高温时性能良好。外部温度 65℃时内部温度则高达 95℃，电池放电结束时温度可达 160℃，电池的结构安全、完好。

(3) 当电池内部或外部受到伤害时，电池不燃烧、不爆炸，安全性最好。

(4) 具有很好的循环寿命特性，经 500 次循环，其放电容量仍大于 95%。

(5) 放电到零也无损坏。

(6) 可快速充电。

(7) 成本比锂离子电池低。

(8) 对环境无污染。

2.7.5 超级电容器

超级电容器是一种具有超级储电能力、可提供强大脉冲功率的物理二次电源。它是介于蓄电池和传统静电电容器之间的一种新型储能装置。超级电容器主要是利用电极/电解

质界面电荷分离所形成的双电层，或借助电极表面快速的氧化还原反应所产生的法拉第准电容来实现电荷和能量的储存的。它是一种电化学元件，在电极与电解液接触面间具有极高的比电容和非常大的接触表面积，但其储能的过程并不发生化学反应，并且这种储能过程是可逆的，因此超级电容器可反复充放电数十万次。

1. 超级电容器的结构

超级电容器单体主要由电极、电解质、集电极、隔离膜连线极柱、密封材料和排气阀等组成。电极一般有碳电极材料、金属氧化物及其水合物电极材料、导电聚合物电极材料，要求电极内阻小、电导率高、表面积大、尽量薄。电解质需有较高的导电性(内阻小)和足够的电化学稳定性(提高单体电压)。电解质材料分为有机类和无机类，或分为液态类和固态类。集电极选用导电性能良好的金属和石墨等来充当，如泡沫镍、镍网(箔)、铝箔、钛网(箔)及碳纤维等。隔离膜防止超级电容器相邻两电极短路，保证接触电阻较小，尽量薄，通常使用多孔隔膜。有机电解质通常使用聚合物或纸作为隔膜，水溶液电解质可采用玻璃纤维或陶瓷隔膜。




图 2.35 电动汽车用超级电容器

电极的材料、制造技术、电解质的组成和隔离膜质量对超级电容器的性能有较大影响。

图 2.35 所示为电动汽车用超级电容器。


【宁波 196 路超级电容器公交】

2. 超级电容器的分类

超级电容器可以按不同的方式进行分类。

(1) 按照储能原理分类：因电荷分离而产生的双电层电容器，欠电位沉积或吸附电容而产生的法拉第准电容器，还有双电层与准电容混合型电容器。

(2) 按照结构形式分类：两电极组成相同且电极反应相同，但反应方向相反，称为对称型；两电极组成不同或反应不同，称为非对称型。

(3) 按照电极材料分类：以活性炭粉末、活性炭纤维、碳气凝胶、纳米碳管、网络结构活性炭为电极材料的超级电容；以贵金属二氧化钌、氧化镍、氧化锰为电极材料的超级电容器；以聚吡咯、聚苯胺、聚对苯等聚合有机物为电极的超级电容器。

(4) 按照电解液不同分类：水溶液体系超级电容器，这种电容器电导率高、成本低、分解电压低(1.2V)；有机体系超级电容器，这种电容器电导率低、成本高、分解电压高(3.5V)；固体物电解质超级电容器，这种电容器可靠性高、电导率低、无泄漏、高比能量与薄型化。

3. 超级电容器的特点

(1) 超级电容器的优点如下。

① 高功率密度。超级电容器的内阻小，输出功率密度高，是一般蓄电池的数十倍。

② 循环寿命长。具有至少十万次以上的充电寿命，没有“记忆效应”。

③ 充电速度快。可以用大电流给超级电容器充电，充电 10s～10min 可达到其额定容量的 95%以上。

④ 工作温度范围宽。能在－40～60℃的环境温度中正常工作。

⑤ 简单方便。充放电线路简单，无须充电电池那样的充电电路，安全系数高，长期使用免维护；检测方便，剩余电量可直接读出。

⑥ 绿色环保。超级电容器在生产过程中不使用重金属和其他有害化学物质，因而在生产、使用、储存及拆解过程均没有污染，是一种新型的绿色环保电源。

(2) 超级电容器自身存在的缺点如下。

① 线性放电。超级电容器线性放电的特性使它无法完全放电。

② 低能量密度。目前超级电容器可储存的能量比化学电源少得多。

③ 低电压。超级电容器单体电压低，需要多个电容器串联才能提升整体电压。

④ 高自放电。它的自放电速率比化学电源要高。

铅酸蓄电池、超级电容器、普通电容器三种储能元件的性能对比见表2-7。

表2-7　三种储能元件的性能对比

性　　能	铅酸蓄电池	超级电容器	普通电容器
充电时间	1～5h	0.3～30s	10^{-6}～10^{-3}s
放电时间	0.3～3h	0.3～30s	10^{-6}～10^{-3}s
比能量/(W·h/kg)	10～100	1～10	<0.1
比功率/(W/kg)	<10^3	<10^4	<10^5
循环寿命/次	10^3	>10^5	>10^5
充放电效率	0.7～0.85	0.85～0.98	>0.95

2.7.6 飞轮电池

飞轮电池是20世纪90年代才提出的新概念电池。它突破了化学电池的局限，用物理方法实现储能。

1. 飞轮电池的结构与原理

飞轮电池系统由飞轮、电动机、发电机和输入电子装置、输出电子装置共同组成，如图2.36所示。

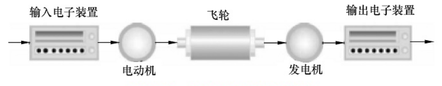


图2.36　飞轮电池组成示意图

飞轮电池通过输入、输出电子装置与外部大功率的电气系统相连，外部系统所传输的能量经由电动机通过提升飞轮的转速将电能转化为机械能并储存。当需要向负载输出功率时，飞轮电池通过发电机再将机械能转化为电能，同时飞轮转速相应降低。由于飞轮电池系统的能量转换是单线程的，即不可能同时输入、输出能量，为了降低电池系统质量和制造成本，通常将电动机、发动机及输入电子装置、输出电子装置集成在一起。

飞轮电池储能的关键在于降低机械能的损失，这部分能量的损失主要由空气摩擦阻力和旋转摩擦阻力两部分组成。根据降低空气摩擦阻力方式的不同，可以将飞轮电池分为低速飞轮电池和高速飞轮电池。低速飞轮电池通过增加飞轮质量来降低空气摩擦所带来的影响。而高速飞轮电池则通过降低飞轮工作环境的空气压力来降低空气摩擦阻力。此类电池的飞轮受益于新型高强度复合材料的使用而具有质量轻和高转速的特点，其理想工作环境为真空环境，由于技术限制，通常只是将空气摩擦阻力降低至可以接受的程度。为了减小高速旋转时所产生的旋转摩擦阻力，飞轮电池系统通常通过两个磁悬浮轴承的非接触式支承固定在真空空间内。高速飞轮电池体积小，适合车载使用。

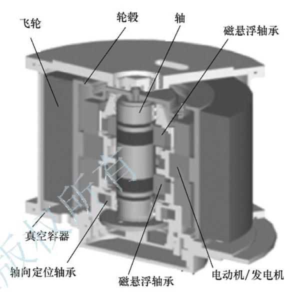


图 2.37　飞轮电池结构

飞轮电池结构如图 2.37 所示。它主要由飞轮、轴、轴承、电动机、真空容器和电力电子变换器等部件组成。飞轮是整个电池装置的核心部件，直接决定了整个装置的储能多少。电力电子变换器通常是由场效应晶体管和绝缘栅极场效应晶体管组成的双向逆变器，它们决定了飞轮装置能量输入、输出的大小。

2. 电池性能的比较

现在广泛使用的储能电池是基于电化学原理的化学电池。它将电能转化为化学能并储存，再转化为电能输出。化学电池的主要优点是价格低廉，技术成熟；但存在污染严重，效率低下，充电时间长，用电时间短，使用过程中电能不易控制等缺点。

超导电池也是储能电池。它把电能转化为磁能并储存在超导线圈的磁场中，由于超导状态下线圈没有电阻，因此能量损耗非常小，效率也高，对环境污染也小。但由于超导状态在线圈处于极低温度下才能实现，维持线圈处于超导状态所需要的低温需耗费大量能量，而且维持装置过大，不易小型化，民用的市场前景并不看好。

飞轮电池则兼顾了上述两者的优点，虽然近阶段的价格较高，但伴随着技术的进步，必将有一个非常广阔的前景。

三种典型储能电池的性能对比见表 2－8。

表 2－8　三种典型储能电池的性能对比

性　　能	化学电池	飞轮电池	超导电池
储能方式	化学能	机械能	超导能
使用寿命	3～5 年	＞20 年	≈20 年
技术	成熟	验证	验证
温度范围	限制	不限	不限
外形尺寸(同功率)	大	小	中

续表

性　　能	化学电池	飞轮电池	超导电池
储能密度	小	大	大
放能深度	浅	深	深
价格	低	高	较高
环境影响	污染	无污染	无污染



1. 电动汽车用动力电池有哪些类型?
2. 动力电池的性能指标主要有哪些?
3. 电动汽车对动力电池有哪些要求?
4. 电动汽车用蓄电池主要有哪几种?其特点是什么?
5. 燃料电池主要有哪几种?其特点是什么?
6. 太阳电池主要有哪些类型?其特点是什么?

第 3 章　电动汽车用电动机

电动机是电动汽车驱动系统的核心部件，其性能直接影响电动汽车驱动系统的性能，特别是影响电动汽车的最高车速、加速性能及爬坡性能等。因此，在开发电动汽车之前初步确定电动机类型及参数进而对电动机进行选择是至关重要的。

3.1　概　　述

3.1.1　电动机的分类

1. 电动机的分类方法

电动机的分类方法很多，主要的如图 3.1 所示。

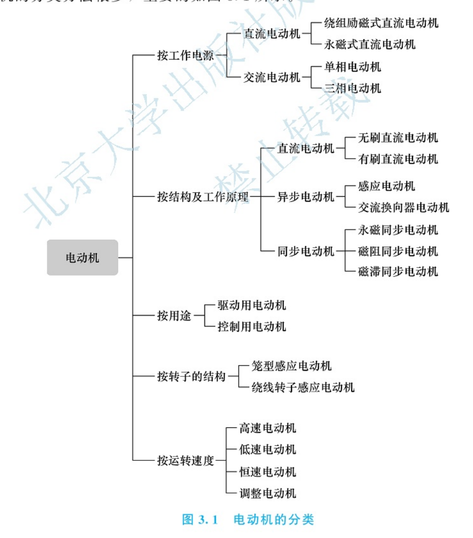


图 3.1　电动机的分类

电动汽车最早采用的是有刷直流电动机。随着电子技术和自动控制技术的发展及电动



汽车技术要求的提高，无刷直流电动机、异步电动机、永磁同步电动机和开关磁阻电动机等显示出比有刷直流电动机更优越的性能，在电动汽车中应用越来越广泛。

2. 各类电动机介绍

(1) **有刷直流电动机**。有刷直流电动机具有起动加速时驱动力大、调速控制简单、技术成熟等优点。但是有刷直流电动机的电枢电流由电刷和换向器引入，换向时产生电火花，换向器容易烧蚀，电刷容易磨损，需经常更换，维护工作量大。接触部分存在磨损，不仅使电动机效率降低，还限制了电动机的工作转速。新研制的电动汽车基本不采用有刷直流电动机。

(2) **无刷直流电动机**。无刷直流电动机是一种高性能的电动机。它既有交流电动机的结构简单、运行可靠、维护方便等诸多优点，又具备运行效率高、无励磁损耗、运行成本低和调速性能好等特点。因此，它在电动汽车上的应用与日俱增。

(3) **异步电动机**。异步电动机在电动汽车上广泛应用，这是因为异步电动机采用变频调速时，可以取消机械变速器，实现无级变速，使传动效率大为提高。另外，异步电动机很容易实现正反转，再生制动能量的回收也更简单。当采用笼型转子时，异步电动机还具有结构简单、坚固耐用、价格便宜、工作可靠、效率高和免维护等优点。

(4) **永磁同步电动机**。永磁同步电动机结构上与无刷直流电动机相似，不同之处在于它采用正弦波驱动，所以在具备无刷直流电动机优点的同时，还具有噪声低、体积小、功率密度大、转动惯量小、脉动转矩小、控制精度高等特点，特别适用于混合动力汽车电动机驱动系统，可达到减小系统体积，改善汽车加速性能和行驶平稳性等目的，因此，永磁同步电动机受到了全世界各大汽车生产厂家的重视。

(5) **开关磁阻电动机**。开关磁阻电动机是一种新型电动机，因结构简单、坚固，工作可靠，效率高，而且调速系统运行性能和经济指标比普通的交流调速系统好，具有很大的潜力，被公认是一种极有发展前途的电动汽车驱动电动机。

随着电子技术和计算机技术的飞速发展，新的电动机理论与控制方式层出不穷，正推动着新的电动机驱动技术迅猛发展。高密度、高效率、轻量化、低成本、宽调速牵引电动机驱动系统已成为各国研究和开发的主要热点，如永磁式开关磁阻电动机、转子磁极分割型混合励磁结构同步电动机、永磁无刷交流电动机等。

各种电动机的性能比较见表 3-1。

表 3-1 各种电动机的性能比较

性　　能	直流电动机	交流电动机	永磁电动机	开关磁阻电动机
转速范围/(r/min)	4000～6000	12000～20000	4000～10000	>15000
功率密度	低	中	高	较高
功率因数		82～85	90～93	60～65
峰值效率/(%)	85～89	94～95	95～97	85～90
负荷效率/(%)	80～87	90～92	85～97	78～86
过载能力/(%)	200	300～500	300	300～500
恒功率区比例		1∶5	1∶2.25	1∶3

续表

性　　能	直流电动机	交流电动机	永磁电动机	开关磁阻电动机
电动机质量	重	中	轻	轻
电动机外形尺寸	大	中	小	小
可靠性	一般	好	优良	好
结构坚固性	差	好	一般	优良
控制操作性能	最好	好	好	好
控制器成本	低	高	高	一般

3.1.2 电动机的主要性能指标

电动机的主要性能指标有额定功率、峰值功率、额定转速、最高工作转速、额定转矩、峰值转矩、堵转转矩、额定电压、额定电流、额定频率等。

(1) **额定功率**。额定功率是指电动机额定运行条件下轴端输出的机械功率。电动机的功率等级为1kW、2.2kW、3.7kW、5.5kW、7.5kW、11kW、15kW、18.5kW、22kW、30kW、37kW、45kW、55kW、75kW、90kW、110kW、132kW、150kW、160kW、185kW、200kW及以上。

(2) **峰值功率**。峰值功率是指在规定的时间内，电动机运行的最大输出功率。

(3) **额定转速**。额定转速是指电动机额定运行(额定电压、额定功率)条件下电动机的转速。

(4) **最高工作转速**。最高工作转速是在额定电压时，电动机带载运行所能达到的最高转速。它影响电动汽车的最高设计速度。

(5) **额定转矩**。额定转矩是指电动机在额定功率和额定转速下的输出转矩。

(6) **峰值转矩**。峰值转矩是指电动机在规定的持续时间内允许输出的最大转矩。

(7) **堵转转矩**。堵转转矩是指转子在所有角位堵住时所产生的最小转矩。

(8) **额定电压**。额定电压是指电动机正常工作的电压。电动机电源的电压等级为36V、48V、120V、144V、168V、192V、216V、240V、264V、288V、312V、336V、360V、384V、408V、540V、600V。

(9) **额定电流**。额定电流是指电动机额定运行(额定电压、额定功率)条件下电枢绕组(或定子绕组)的线电流。

(10) **额定频率**。额定频率是指电动机额定运行条件下电枢(或定子侧)的频率。

当电动机在额定运行条件下输出额定功率时，称为满载运行，这时电动机的运行性能、经济性及可靠性等均处于优良状态。输出功率超过额定功率时称为过载运行，这时电动机的负载电流大于额定电流，会引起电动机过热，从而缩短电动机的使用寿命，严重时甚至烧毁电动机。电动机的输出功率小于额定功率时称为轻载运行，这时电动机的效率和功率因数等运行性能均较差，因此应尽量避免电动机轻载运行。

3.1.3 电动汽车对电动机的要求

电动汽车在行驶过程中，经常频繁地起动、停车，加速、减速等，这就要求电动汽车

中的电动机比一般工业应用的电动机性能更高，基本要求如下。

(1) 电动机的运行特性要满足电动汽车的要求，在恒转矩区，要求低速运行时具有大转矩，以满足电动汽车起动和爬坡的要求；在恒功率区，要求低转矩时具有高的速度，以满足电动汽车在平坦的路面能够高速行驶的要求。

(2) 电动机应具有瞬时功率大、带负载起动性能好、过载能力强、加速性能好、使用寿命长等特点。

(3) 电动机应在整个运行范围内具有很高的效率，以提高一次充电的续驶里程。

(4) 电动机应能够在汽车减速时实现再生制动，将能量回收并反馈给蓄电池，使电动汽车具有最佳的能量利用率。

(5) 电动机应可靠性好，能够在较恶劣的环境下长期工作。

(6) 电动机应体积小，质量轻，一般为工业用电动机的1/3～1/2。

(7) 电动机的结构要简单、坚固，适合批量生产，便于使用和维护。

(8) 电动机的价格应便宜，从而能够降低电动汽车的价格，提高性价比。

(9) 电动机运行时噪声应低，以减少污染。

3.2 直流电动机

直流电动机就是将直流电能转化为机械能的电动机，是电动机的主要类型之一，具有结构简单、技术成熟、控制容易等特点，在早期的电动汽车或希望获得更简单结构的电动汽车中得到应用，特别是在场地用电动车和专用电动车上应用更普遍。

3.2.1 直流电动机的分类

直流电动机分为绕组励磁式直流电动机和永磁式直流电动机。在电动汽车所采用的直流电动机中，小功率电动机采用的是永磁式直流电动机，大功率电动机采用的是绕组励磁式直流电动机。

绕组励磁式直流电动机根据励磁方式的不同，可分为他励式、并励式、串励式和复励式四种类型。

1. 他励直流电动机

他励直流电动机的励磁绕组与电枢绕组无连接关系，而由其他直流电源对励磁绕组供电，因此励磁电流不受电枢端电压或电枢电流的影响。永磁式直流电动机也可看作他励直流电动机。

他励直流电动机在运行过程中励磁磁场稳定而且容易控制，容易实现电动汽车的再生制动要求。但当采用永磁励磁时，虽然电动机效率高，质量轻和体积较小，但由于励磁磁场固定，电动机的机械特性不理想，驱动电动机产生不了足够大的输出转矩来满足电动汽车起动和加速时的大转矩要求。

2. 并励直流电动机

并励直流电动机的励磁绕组与电枢绕组相并联，共用同一电源，性能与他励直流电动机基本相同。并励绕组两端电压就是电枢两端电压，但是励磁绕组用细导线绕成，而且匝

数很多，因此具有较大的电阻，使得通过它的励磁电流较小。

3. 串励直流电动机

串励直流电动机的励磁绕组与电枢绕组串联后，再接于直流电源，因此电动机的励磁电流就是电枢电流。这种电动机内磁场随着电枢电流的改变有显著的变化。为了使励磁绕组不致引起大的损耗和电压降，励磁绕组的电阻越小越好，所以串励直流电动机通常用较粗的导线绕成，而且匝数较少。

串励直流电动机在低速运行时，能给电动汽车提供足够大的转矩，而在高速运行时，电动机电枢中的反电动势增大，与电枢绕组串联的励磁绕组中的励磁电流减小，电动机高速时的弱磁调速功能易于实现，因此串励直流电动机驱动系统能较好地符合电动汽车的特性要求。但串励直流电动机由低速到高速运行时弱磁调速特性不理想，随着电动汽车行驶速度的提高，驱动电动机输出转矩快速减小，不能满足电动汽车高速行驶时由于风阻大而需要输出较大转矩的要求。串励直流电动机运行效率低；在实现电动汽车的再生制动时，由于没有稳定的励磁磁场，再生制动的稳定性差；由于再生制动需要加接触器切换，使得驱动电动机控制系统的故障率较高，可靠性较差。另外，串励直流电动机的励磁绕组损耗大，体积和质量也较大。

4. 复励直流电动机

复励直流电动机有并励和串励两个励磁绕组，电动机的磁通由两个绕组内的励磁电流产生。若串励绕组产生的磁通量与并励绕组产生的磁通量方向相同，称为积复励；若两个磁通量方向相反，则称为差复励。

复励直流电动机的永磁励磁部分采用高磁性钕铁硼材料，运行效率高。由于电动机永磁励磁部分有稳定的磁场，因此用该类电动机构成驱动系统时易实现再生制动功能。同时由于电动机增加了增磁绕组，通过控制励磁绕组的励磁电流或励磁磁场的大小，能克服纯永磁他励直流电动机不能产生足够的输出转矩这种缺陷，以满足电动汽车低速或爬坡时的大转矩要求，而电动机的质量或体积比串励电动机的还小。

各种励磁方式直流电动机的电路如图 3.2 所示。图中：I_a 为电枢电流；I_f 为励磁电流；U 为电源电压；U_f 为励磁电压；I 为负载电流。

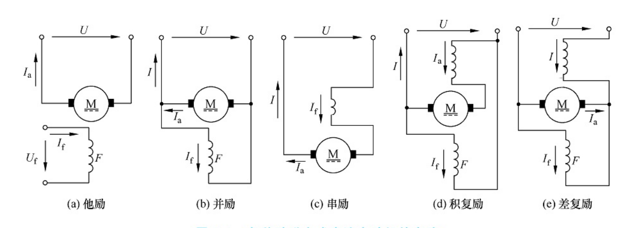


图 3.2 各种励磁方式直流电动机的电路

电动汽车使用的直流电动机主要是他励直流电动机(包括永磁直流电动机)、串励直流

电动机、复励直流电动机三种，见表3-2。

表3-2　电动汽车所使用的直流电动机

功　　率	电动机类型	应用范围	应用实例
小功率 (0.1～10kW)	小型高效的永磁式直流电动机	小型、低速的搬运设备	电动自行车、休闲用电动汽车、高尔夫球车、电动叉车等
中等功率 (10～100kW)	他励直流电动机、复励直流电动机或串励直流电动机	结构简单、转矩要求较大的电动车	电动货车等
大功率 (>100kW)	串励直流电动机	低速、高转矩的专用电动车	矿石搬运电动车、玻璃电动搬运车等

3.2.2　直流电动机的结构与特点

1. 直流电动机的结构

直流电动机(图3.3)由定子与转子两大部分构成，定子和转子之间的间隙称为气隙。

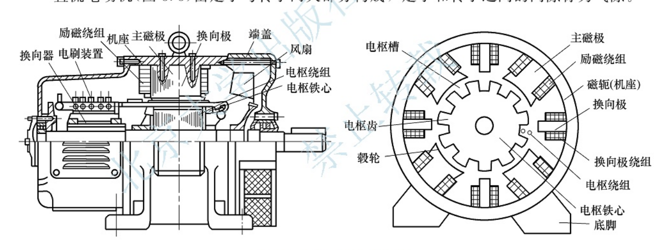


图3.3　直流电动机的结构

(1) 定子部分。直流电动机定子主要由主磁极、机座、换向极和电刷装置等组成。

① 主磁极。主磁极的作用是建立主磁场。它由主磁极铁心和套装在铁心上的励磁绕组构成。主磁极铁心一般由1～1.5mm的低碳钢板冲压成一定形状叠装固定而成，是主磁路的一部分。励磁绕组用扁铜线或圆铜线绕制而成，产生励磁磁动势。

② 机座。机座用铸钢或厚钢板焊接而成。它既是主磁路的一部分，又是电动机的结构框架。

③ 换向极。换向极的作用是改善直流电动机的换向性能，使直流电动机运行时不产生有害的火花。它由换向极铁心和套装在铁心上的换向极绕组构成。

④ 电刷装置。电刷装置由电刷、刷握、刷杆、汇流排等组成，用于电枢电路的引入或引出。

(2) 转子部分。转子部分包括电枢铁心、电枢绕组、换向器等。

① 电枢铁心。电枢铁心既是主磁路的组成部分，又是电枢绕组的支撑部分。电枢绕组嵌放在电枢铁心的槽内。电枢铁心一般用0.55mm厚的硅钢冲片叠压而成。

② 电枢绕组。电枢绕组由扁铜线或圆铜线按一定规律绕制而成。它是直流电动机的电路部分，也是产生电动势和电磁转矩进行机电能量转换的部分。

③ 换向器。换向器由冷拉梯形铜排和绝缘材料等构成，用于电枢电流的换向。

2. 直流电动机的特点

直流电动机具有以下特点。

(1) 调速性能好。直流电动机可以在重负载条件下，实现均匀、平滑的无级调速，而且调速范围较宽。

(2) 起动力矩大。直流电动机可以均匀而经济地实现转速调节，因此，凡是在重负载下起动或要求均匀调节转速的机械(如大型可逆轧钢机、卷扬机、电力机车、电车等)，都可用直流电动机拖动。

(3) 控制比较简单。直流电动机一般用斩波器控制，具有高效率、控制灵活、质量轻、体积小、响应快等优点。

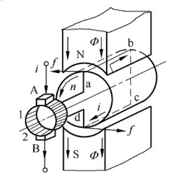
(4) 有易损件。直流电动机存在电刷、换向器等易磨损器件，因此必须进行定期维护或更换。

电动汽车专用的直流电动机和其他通用的电动机相比，应在耐高温性、抗振动性、低损耗性、抗负载波动性及小型轻量化、免维护性等方面给予特殊考虑。

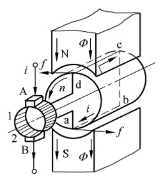
除此之外，电动汽车用直流电动机大多在较低的电压下驱动，同时是大电流电路，因此需要注意连接接线的接触电阻。

3.2.3 直流电动机的工作原理

图3.4所示为直流电动机的工作原理。图中，定子有一对N、S极，电枢绕组的末端分别接到两个换向片上，正、负电刷A和B分别与两个换向片接触。



(a) 导体ab处于N极下



(b) 导体ab处于S极下


【直流电动机的工作原理】

图3.4 直流电动机的工作原理

1、2—换向片

如果给两个电刷加上直流电源，如图3.4(a)所示，则有直流电流从电刷A流入，经过线圈abcd，从电刷B流出。根据电磁力定律，载流导体ab和cd受到电磁力的作用，其方向可用左手定则判定，两段导体受到的力形成了一个转矩，使得转子逆时针转动。如果转子转到图3.4(b)所示的位置，电刷A和换向片2接触，电刷B和换向片1接触，直流

电流从电刷 A 流入，在线圈中的流动方向是 dcba，从电刷 B 流出。此时载流导体 ab 和 cd 受到电磁力的作用方向同样可用左手定则判定，它们产生的转矩仍然使得转子逆时针转动。这就是直流电动机的工作原理。

直流电动机外加的电源是直流的，但由于电刷和换向片的作用，在线圈中流过的电流是交流的，其产生的转矩的方向却是不变的。

3.2.4 直流电动机的基本方程

1. 电枢绕组的感应电动势

直流电动机电枢绕组的感应电动势是指从一对正负电刷引出的电动势，也称电枢电动势，可表示为

$$E_a = C_e \Phi n \tag{3-1}$$

式中，E_a 为电枢感应电动势；C_e 为电动势常数，与电动机结构有关；Φ 为每极磁通量；n 为电动机转速。

2. 直流电动机的电磁转矩

直流电动机的电磁转矩是指电枢上所有载流导体在磁场中受力所形成的转矩的总和，可表示为

$$T_e = C_T \Phi I_a \tag{3-2}$$

式中，T_e 为电磁转矩；C_T 为转矩常数，与电动机结构有关；I_a 为电枢电流。

直流电动机的基本方程与励磁方式有关，励磁方式不同，基本方程略有差别。下面以他励直流电动机为例建立电压方程、转矩方程和功率方程。

3. 电压方程

根据他励直流电动机的等效电路，可以得到电枢回路的电压方程为

$$\begin{gathered} U_a = E_a + I_a R_a \\ E_a = \omega_m M I_f \end{gathered} \tag{3-3}$$

式中，U_a 为电枢电压；E_a 为电枢感应电动势；R_a 为电枢电阻；ω_m 为电枢角速度；M 为互感；I_f 为励磁电流。

励磁回路的电压方程为

$$U_f = I_f R_f \tag{3-4}$$

式中，U_f 为励磁电压；R_f 为励磁电阻。

根据式(3-3)和式(3-4)，可以得出以下结论。

(1) 对于永磁式直流电动机，有 $I_f M = \Phi$。

(2) 对于并励直流电动机，有 $U_f = U_a = U$，$I_f + I_a = I$。

(3) 对于串励直流电动机，有 $U_f + U_a = U$，$I_f = I_a = I$。

(4) 对于复励直流电动机，其特性介于串励直流电动机和并励直流电动机之间。

4. 转矩方程

电动机空载时，轴上输出转矩 $T_2 = 0$，则有 $T_e = T_0$。

当负载转矩为 T_L 时，轴上输出转矩 $T_2=T_L$，电动机匀速稳定运行时有

$$T_e=T_2+T_0 \tag{3-5}$$

式中，T_e 为电磁转矩，为拖动性质转矩；T_0 为空载转矩，是由电动机的机械摩擦和铁耗引起的转矩；(T_2+T_0)为总的制动转矩，方向与 T_e 相反。

电磁转矩为

$$T_e=MI_fI_a \tag{3-6}$$

根据式(3－3)～式(3－6)，可以得到各种直流电动机的转速、转矩特性曲线，如图 3.5 所示。

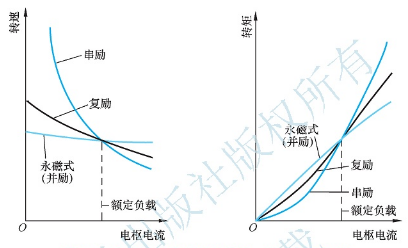


图 3.5　各种直流电动机的转速、转矩特性曲线

由式(3－3)可得电枢角速度为

$$\omega_m=\frac{U_a-R_aI_a}{MI_f} \tag{3-7}$$

从式(3－7)可以看出，通过调整励磁电流可实现对转速的大幅度控制。

对于串励直流电动机，有 $T_e=MI_a^2$，所以大电流通过时会产生非常大的转矩；如果电流变小，由式(3－7)可知，转速也将大幅度上升，由此可以得到电动汽车所希望的特性。

图 3.6 为直流电动机的转速-转矩、电压特性曲线。

图 3.6　直流电动机的转速-转矩、电压特性曲线

5. 功率方程

他励直流电动机输入功率为

$$\begin{aligned}P_1&=UI_a=I_a(E_a+I_aR_a)=E_aI_a+I_a^2R_a\\&=P_{em}+P_{cu\,a}\end{aligned} \tag{3-8}$$

式中，P_1 为输入功率；P_{em} 为电磁功率；$P_{cu\,a}$ 为电枢回路上的铜耗。

3.2.5 直流电动机的运行特性



【直流电动机运行特性仿真】

直流电动机的运行特性主要包括直流电动机的工作特性和直流电动机的机械特性。

直流电动机的工作特性是指电动机的转速特性、转矩特性和效率特性，即在保持额定电压，额定励磁电流(他励、并励)或励磁调节不变(串励、复励)的情况下，电动机的转速、电磁转矩和效率随电枢电流(或输出功率)变化的特性。

直流电动机的机械特性是指在电源电压恒定、励磁调节电阻和电枢回路电阻不变的情况下，电动机的转速与电磁转矩之间的关系，又称转矩-转速特性，是电动机的重要特性。

不同励磁方式直流电动机的运行特性是不同的，下面分别予以介绍。

1. 并励(他励)直流电动机的运行特性

(1) 转速特性。并励(他励)直流电动机的转速特性为

$$n=\frac{U-R_aI_a}{C_e\Phi}=n_0-\Delta n \tag{3-9}$$

式中，$n_0=\dfrac{U}{C_e\Phi}$为电动机的理想空载转速；$\Delta n=\dfrac{R_aI_a}{C_e\Phi}$为转速调整率，由电枢电阻压降引起，一般为3%～8%。

并励(他励)直流电动机在运行时，励磁绕组绝对不能断开。如果励磁电流为零，电枢电流迅速增大，若负载较小，则会造成“飞车”事故。

(2) 转矩特性。并励直流电动机的转矩特性可表示为

$$T_e=C_T\Phi I_a=C_T\Phi(I+I_f) \tag{3-10}$$

式中，I为负载电流；I_f为励磁电流。

如果忽略电枢反应，则转矩特性是一条过原点的直线。

(3) 效率特性。直流电动机的效率特性可表示为

$$\eta=\frac{P_2}{P_1}\times 100\%=\frac{P_2}{P_2+P_b+P_k}\times 100\% \tag{3-11}$$

式中，P_1为输入功率；P_2为输出功率；P_b为直流电动机的不变损耗，与负载电流变化无关；P_k为直流电动机的可变损耗，随负载电流二次方变化。

直流电动机的效率具有普遍意义。电动机的额定效率是指电动机额定运行时的效率。一般直流电动机的效率为75%～85%。

并励直流电动机的工作特性曲线如图3.7所示。

(4) 机械特性。并励(他励)直流电动机的机械特性可表示为

$$n=\frac{U}{C_e\Phi}-\frac{R_a+R_J}{C_eC_T\Phi^2}T_e \tag{3-12}$$

式中，R_J为电枢回路外的串联电阻。

根据式(3-12)可以得到并励(他励)直流电动机的机械特性曲线，即改变电枢电压、改变励磁电流、改变电枢回路电阻时的机械特性曲线，如图3.8～图3.10所示。

从图3.8可以看出，逐渐减小电源电压时，理想空载转速逐渐下降，但从空载到满载

转速变化很小，这种特性称为硬机械特性。这使并励直流电动机和他励直流电动机具有优良的调速性能。

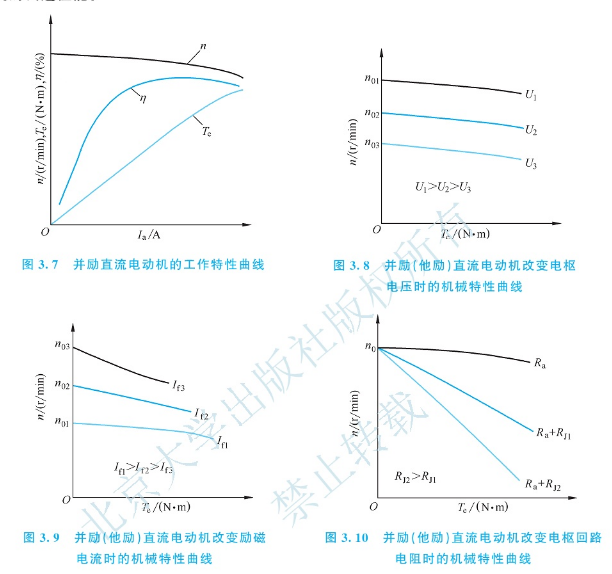


图 3.7 并励直流电动机的工作特性曲线

图 3.8 并励(他励)直流电动机改变电枢电压时的机械特性曲线

图 3.9 并励(他励)直流电动机改变励磁电流时的机械特性曲线

图 3.10 并励(他励)直流电动机改变电枢回路电阻时的机械特性曲线

从图 3.9 可以看出，逐渐减小励磁电流时，理想空载转速逐渐上升，曲线斜率逐渐增大，使特性变软，电动机运行的稳定性变差。过分“弱磁”时，电动机转速过高，甚至引起“飞车”。因此，电动机采用弱磁调节时必须注意。

从图 3.10 可以看出，当电枢回路电阻从零逐渐开始增大时，机械特性曲线的斜率逐渐增大，使特性逐渐变软，但电动机的理想空载转速不变。

2. 串励直流电动机的运行特性

串励直流电动机广泛应用于交通运输中，它的特点是负载电流、电枢电流和励磁电流是一个电流，即 $I=I_a=I_f$，气隙主磁通随电枢电流的变化而变化，同时对电动机转速产生较大影响。

(1) **转速特性**。串励直流电动机的转速特性可表示为

$$n=\frac{U-(R_a+R_f)I}{C_e\Phi} \tag{3-13}$$

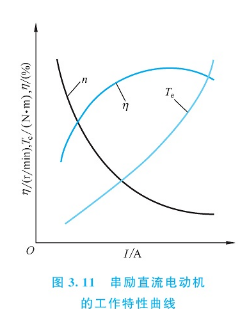


图 3.11　串励直流电动机的工作特性曲线

(2) **转矩特性**。串励直流电动机的转矩特性可表示为

$$T_e = C_T \Phi I \tag{3-14}$$

串励直流电动机的工作特性曲线如图 3.11 所示。从转矩特性可以看出，当负载增加时，串励直流电动机的转矩快速增加，但与此同时转速也快速下降，因此基本保持了功率恒定，即串励直流电动机具有恒功率特性。

(3) **机械特性**。串励直流电动机的机械特性可表示为

$$n = \frac{1}{C_e K_f}\left(\sqrt{\frac{C_T K_f}{T_e}}U - R_a - R_f\right) \tag{3-15}$$

式中，K_f 为每极磁通量与励磁电流之间的比例系数。

根据式(3-15)，可以得到串励直流电动机的机械特性曲线，如图 3.12～图 3.13 所示。

由于串励电动机的负载电流、电枢电流和励磁电流相等，因此调节电源电压或电枢回路电阻的同时，励磁电流也随之变化。

从图 3.12～图 3.13 可以看出，转速随转矩的增加迅速下降，这种特性称为软机械特性。

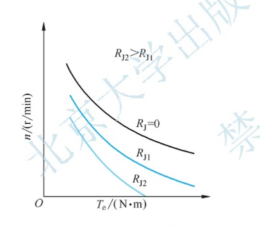


图 3.12　串励直流电动机改变电枢回路电阻时的机械特性曲线

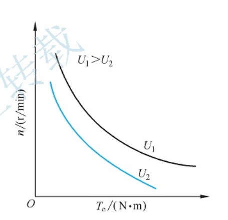


图 3.13　串励直流电动机改变电枢电压时的机械特性曲线

串励直流电动机具有恒功率特性、起动转矩大及调速性能优良等特点，在电力机车、城市电车、特种电动车等交通工具上得到广泛应用。

3. *复励直流电动机的运行特性*

复励直流电动机既有并励绕组，又有串励绕组，因此其特性介于并励直流电动机和串励直流电动机之间。当复励直流电动机以并励为主时，其特性接近于并励直流电动机；当复励直流电动机以串励为主时，其特性接近于串励直流电动机。

3.2.6　直流电动机的控制

从直流电动机的转速特性和机械特性可以看出，其转速控制方法主要有电枢调压控

制、磁场控制和电枢回路串电阻控制。

1. 电枢调压控制

电枢调压控制是指通过改变电枢的端电压来控制电动机的转速。他励直流电动机改变电枢端电压时的转速控制特性曲线如图3.14所示。

电枢调压控制只适合电动机基速以下的转速控制。它可保持电动机的负载转矩不变，电动机转速近似与电枢端电压成比例变化，所以称其为恒转矩调速。

直流电动机采用电枢调压控制可实现在宽广范围内的连续平滑的速度控制，调速比一般可达1∶10，如果与磁场控制配合使用，调速比可达1∶30。

图3.14 他励直流电动机改变电枢端电压时的转速控制特性曲线

电枢调压控制需要专用的可控直流电源，过去常用电动机-发电机组，现在大、中容量的可控直流电源广泛采用晶闸管可控整流电源，小容量则采用电力晶体管的脉宽调制(Pulse Width Modulation，PWM)控制电源，电动汽车用的直流电动机常用斩波控制器作为电枢调压控制电源。

电枢调压控制的调速过程：当磁通保持不变时，减小电压，由于转速不立即发生变化，反电动势也暂时不变化，同时由于电枢电流减小，转矩也减小。如果阻转矩未变，则转速下降。随着转速的降低，反电动势减小，电枢电流和转矩就随着增大，直到转矩与阻转矩再次平衡为止，但这时转速已经较原来降低了。

2. 磁场控制

磁场控制是指通过调节直流电动机的励磁电流改变每极磁通量，从而调节电动机的转速。他励直流电动机带恒转矩负载时磁场控制的转速控制特性曲线如图3.15所示。

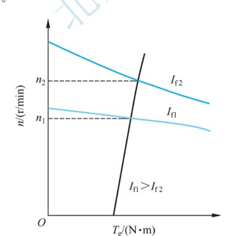


图3.15 他励直流电动机带恒转矩负载时磁场控制的转速控制特性曲线

磁场控制只适合电动机基数以上的控制。当电枢电流不变时，具有恒功率调速特性。磁场控制效率高，但调速范围小，一般不超过1∶3，而且响应速度较慢。

磁场控制可采用可变电阻器，也可采用可控整流电源作为励磁电源。

磁场控制的调速过程：当电压保持恒定时，减小磁通，由于机械惯性作用，转速不立即发生变化，于是反电动势减小，电枢电流随之增加。由于电枢电流增加的影响超过磁通减小的影响，因此转矩也增加。如果阻转矩未变，则转速升高。随着转速的升高，反电动势增大，电枢电流和转矩随之减小，直到转矩和阻转矩再次平衡为止，但这时转速已经较原来升高了。

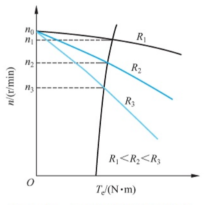


图 3.16　电枢回路串电阻时的转速控制特性曲线

3. 电枢回路串电阻控制

电枢回路串电阻控制是指当电动机的励磁电流不变时，通过改变电枢回路电阻来调节电动机的转速。其转速控制特性曲线如图 3.16 所示。

这种控制方法的机械特性较软，而且电动机运行不稳定，一般很少应用。对于小型串励电动机，则常采用这种电枢回路串电阻控制方式。

3.3　无刷直流电动机

无刷直流电动机是用电子换向装置代替了有刷直流电动机的机械换向装置，保留了有刷直流电动机宽阔而平滑的优良调速性能，克服了有刷直流电动机机械换向带来的一系列的缺点。无刷直流电动机体积小，质量轻，可做成各种体积形状，效率高，转矩高，精度高，数字式控制，是最理想的调速电动机之一，在电动汽车上有着广泛的应用前景。

3.3.1　无刷直流电动机的分类

无刷直流电动机按照工作特性，可以分为具有直流电动机特性的无刷直流电动机和具有交流电动机特性的无刷直流电动机。

1. 具有直流电动机特性的无刷直流电动机

具有直流电动机特性的无刷直流电动机，反电动势波形和供电电流波形都是矩形波，所以又称矩形波同步电动机。这类电动机由直流电源供电，借助位置传感器来检测主转子的位置，由检测出的信号去触发相应的电子换相线路以实现无接触式换相。显然，这种无刷直流电动机具有有刷直流电动机的各种运行特性。

2. 具有交流电动机特性的无刷直流电动机

具有交流电动机特性的无刷直流电动机，反电动势波形和供电电流波形都是正弦波，所以又称正弦波同步电动机。这类电动机也由直流电源供电，但通过电子换相器(自控式逆变器)将直流电变换为交流电，然后去驱动一般的同步电动机。因此，这种无刷直流电动机具有同步电动机的各种运行特性。

下面介绍的无刷直流电动机主要是指具有直流电动机特性的无刷直流电动机。

3.3.2　无刷直流电动机的结构与特点

1. 无刷直流电动机的结构

无刷直流电动机主要由电动机本体、电子换相器和位置传感器三部分组成。

(1) **电动机本体**。无刷直流电动机的电动机本体由定子和转子两部分组成。

定子是电动机本体的静止部分，由导磁的定子铁心、导电的电枢绕组及固定铁心和绕

组用的一些零部件、绝缘材料、引出部分等组成，如机壳、绝缘片、槽楔、引出线及环氧树脂等。

转子是电动机本体的转动部分，是产生励磁磁场的部件，由永磁体、导磁体和支撑零部件组成。

（2）**电子换相器**。电子换相器由功率开关和位置信号处理电路构成，主要用来控制定子各绕组通电的顺序和时间。无刷直流电动机本质上是自控同步电动机，电动机转子随定子旋转磁场运动，因此，应按一定的顺序给定子各相绕组轮流通电，使之产生旋转的定子磁场。无刷直流电动机的三相绕组中通过的电流是120°电角度的方波，绕组在持续通过恒定电流的时间内产生的定子磁场在空间是静止不动的。而在开关换相期间，随着电流从一相转移到另一相，定子磁场随之跳跃了一个电角度。而转子磁场则随着转子连续旋转。这两个磁场的瞬时速度不同，但是平均速度相等，因此能保持“同步”。无刷直流电动机由于采用了电子换相器，电动机输入电流的频率和电动机转速始终保持同步。电动机和电子换相器不会产生振荡和失步，这也是无刷直流电动机的优点之一。

一般来说，对电子换相器的基本要求：结构简单；运行稳定可靠；体积小，质量轻；功耗小；能按照位置传感器的信号进行正确换向，并能控制电动机的正反转；应能长期满足不同环境条件的要求。

（3）**位置传感器**。位置传感器在无刷直流电动机中起着检测转子磁极位置的作用，为功率开关电路提供正确的换相信息，即将转子磁极的位置信号转换为电信号，经位置信号处理电路处理后控制定子绕组换相。由于功率开关的导通顺序与转子转角同步，因而位置传感器与功率开关一起，起着与传统有刷直流电动机的机械换向器和电刷相类似的作用。位置传感器的种类比较多，有电磁式位置传感器、光电式位置传感器和磁敏式位置传感器等。电磁式位置传感器具有输出信号大、工作可靠、使用寿命长等优点，但其体积比较大，信噪比较低且输出为交流信号，需整流滤波后才能使用。光电式位置传感器性能比较稳定，体积小、质量轻，但对环境要求较高。磁敏式位置传感器的基本原理为霍尔效应和磁阻效应，对环境适应性很强，价格低廉，但精度不高。

图3.17是某无刷直流电动机实物图。

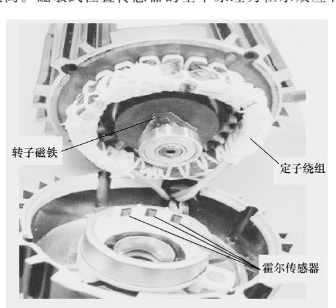


图3.17 无刷直流电动机实物图

2. 无刷直流电动机的特点

无刷直流电动机作为电动汽车用电动机，具有以下优点。

（1）外特性好，非常符合电动汽车的负载特性，尤其是具有低速大转矩特性，能够提供大的起动转矩，满足电动汽车的加速要求。

（2）可以在低、中、高宽速度范围内运行，而有刷电动机由于受机械换向的影响，只能在中低速下运行。

（3）效率高，尤其是在轻载车况

下，仍能保持较高的效率，这对保存珍贵的电池能量是很重要的。

(4) 过载能力强，比Y系列电动机(笼型转子异步电动机)可提高过载能力两倍以上，可满足电动汽车的突起堵转需要。

(5) 再生制动效果好，因无刷直流电动机转子具有很高的永久磁场，在汽车下坡或制动时电动机可完全进入发电机状态，给蓄电池充电，同时起到电制动作用，减轻机械制动负担。

(6) 体积小、质量轻，比功率大，可有效地减轻质量，节省空间。

(7) 无机械换向器，采用全封闭式结构，防止尘土进入电动机内部，可靠性高。

(8) 控制系统比异步电动机简单。

无刷直流电动机的缺点是电动机本身比交流电动机复杂，控制器比有刷直流电动机复杂。

3.3.3 无刷直流电动机的工作原理

无刷直流电动机的工作原理与有刷直流电动机的工作原理基本相同。它是利用电动机转子位置传感器输出信号控制电子换相电路去驱动电子换相器的功率开关器件，使电枢绕组依次馈电，从而在定子上产生跳跃式的旋转磁场，拖动电动机转子旋转。同时，随着电动机转子的转动，转子位置传感器又不断送出位置信号，不断地改变电枢绕组的通电状态，使得在某一磁极下导体中的电流方向保持不变，这样电动机就旋转起来了。

图3.18所示为无刷直流电动机的工作原理。

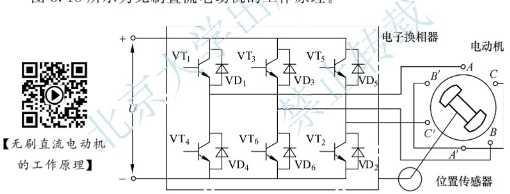


图3.18 无刷直流电动机的工作原理

3.3.4 无刷直流电动机的数学模型

无刷直流电动机的基本物理量有电磁转矩、电枢电流、电动势和转速等。这些物理量的表达式与电动机气隙磁场分布、绕组形式有密切关系。下面以两相导通星型三相六状态为例，分析无刷直流电动机的电枢绕组的感应电动势、电枢电流和电磁转矩等特性。为了便于分析，不考虑开关管的开关动作的过渡和电枢绕组的电感。

1. 电枢绕组的感应电动势

单根导体在气隙磁场的感应电动势为

$$e = B_\sigma L v \tag{3-16}$$

式中，B_σ 为气隙磁感应强度；L 为导体有效长度；v 为导体相对于磁场的线速度。

导体相对于磁场的线速度为

$$v=\frac{\pi D}{60}n=p\tau\frac{n}{30} \tag{3-17}$$

式中，n 为电动机转速；D 为电枢内径；τ 为极距；p 为极对数。

设电枢绕组每相串联匝数为 W_Φ，则每相绕组的感应电动势为

$$E_\Phi=2eW_\Phi \tag{3-18}$$

方波气隙磁感应强度对应的每极磁通为

$$\Phi=B_\sigma a_i\tau L \tag{3-19}$$

式中，a_i 为计算极弧系数。

由上，有

$$e=p\Phi\frac{n}{30a_i} \tag{3-20}$$

每相绕组感应电动势为

$$E_\Phi=\frac{p}{15a_i}W_\Phi\Phi n \tag{3-21}$$

电枢感应电动势为

$$E=2E_\Phi=\frac{2p}{15a_i}W_\Phi\Phi n=C_e\Phi n \tag{3-22}$$

式中，$C_e=\frac{2p}{15a_i}W_\Phi$，为电动势常数。

2. 电枢电流

在每个导通时间内，电压平衡方程为

$$U-2\Delta U=E+2I_aR_a \tag{3-23}$$

式中，U 为电源电压；ΔU 为开关管的饱和压降；I_a 为每相绕组的电流；R_a 为每相绕组的电阻。

电枢电流为

$$I_a=\frac{U-2\Delta U-E}{2R_a} \tag{3-24}$$

3. 电磁转矩

在任一时刻，电动机的电磁转矩 T_e 均由两相绕组的合成磁场与转子永磁场相互作用而产生，则

$$T_e=\frac{2E_\Phi I_a}{\omega}=\frac{EI_a}{\omega} \tag{3-25}$$

式中，$\omega=\frac{\pi n}{30}$，为电动机的角速度。

由此电磁转矩为

$$T_e=C_T\Phi I_a \tag{3-26}$$

式中，$C_T=\frac{4p}{\pi a_i}W_\Phi$，为转矩常数。

4. 转速

电动机转速为

$$n=\frac{U-2\Delta U-2I_aR_a}{C_e\Phi} \tag{3-27}$$

5. 无刷直流电动机的数学模型

由于无刷直流电动机的气隙磁场、反电动势及电流是非正弦的，因此采用直交轴坐标变换已不是有效的方法，通常直接利用电动机本身的相变量来建立数学模型。该方法既简单又具有较好的准确度。

为简化分析，建立无刷直流电动机数学模型时，假设以下条件成立。

(1) 电动机定子绕组为三相星形接法，三相绕组完全对称。

(2) 转子磁钢的磁性能一致。

(3) 三相反电动势波形完全一致。

(4) 三相定子绕组的电阻、电感相同，并且不受电流变化的影响。

(5) 磁路不饱和，不计涡流损耗和磁滞损耗，不计定子斜槽的影响，不计电枢反应。

无刷直流电动机的等效电路如图 3.19 所示。

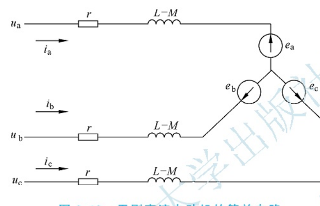


图 3.19 无刷直流电动机的等效电路

(1) 电压方程

根据无刷直流电动机的等效电路图，可以得到三相绕组的电压方程为

$$\begin{bmatrix}u_a\\u_b\\u_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}r&0&0\\0&r&0\\0&0&r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_a\\i_b\\i_c\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}L&M&M\\M&L&M\\M&M&L\end{bmatrix}P\begin{bmatrix}i_a\\i_b\\i_c\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}e_a\\e_b\\e_c\end{bmatrix} \tag{3-28}$$

式中，u_a、u_b、u_c 为定子相绕组电压；i_a、i_b、i_c 为定子相绕组相电流；e_a、e_b、e_c 为定子相绕组电动势；r 为每相绕组的电阻；L 为每相绕组的自感；M 为每两相绕组间的互感；P 为微分算子，$P=\mathrm{d}/\mathrm{d}t$。

由于转子磁阻不随转子位置变化而变化，因而定子绕组的自感和互感为常数。

当三相绕组为星形接法且没有中线时，则有

$$i_a+i_b+i_c=0 \tag{3-29}$$

并且

$$Mi_a+Mi_b=-Mi_c \tag{3-30}$$

由此得到电压方程为

$$\begin{bmatrix}u_a\\u_b\\u_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}r&0&0\\0&r&0\\0&0&r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_a\\i_b\\i_c\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}L-M&0&0\\0&L-M&0\\0&0&L-M\end{bmatrix}P\begin{bmatrix}i_a\\i_b\\i_c\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}e_a\\e_b\\e_c\end{bmatrix} \tag{3-31}$$

(2) 电磁转矩方程

无刷直流电动机的电磁转矩方程与普通直流电动机相似，其电磁转矩大小与磁通和电

流幅值成正比，即

$$T_e=\frac{1}{\omega}(e_a i_a+e_b i_b+e_c i_c) \tag{3-32}$$

为产生恒定的电磁转矩，要求定子电流为方波，反电动势为梯形波，并且在每半个周期内，方波电流的持续时间为120°电角度，梯形波的反电动势的平顶部分也要持续120°电角度以上，二者应严格同步。在理想情况下，任何时刻定子绕组只有两相导通，并且每一相电流和反电动势数值完全相等方向完全相反，则电磁功率为

$$P_e=p(e_a i_a+e_b i_b+e_c i_c)=2pe_s i_s \tag{3-33}$$

式中，e_s 为定子绕组各相电动势的幅值；i_s 为定子绕组各相电流的幅值。

电磁转矩又可写为

$$T_e=\frac{P_e}{\omega}=\frac{2pe_s i_s}{\omega} \tag{3-34}$$

无刷直流电动机通电期间，带电导体处于相同的磁感应强度下，电枢每相绕组的感应电动势为

$$e_s=\frac{pN}{60}\Phi n=K_e\Phi n \tag{3-35}$$

式中，N 为电枢绕组每相串联导体数；K_e 为电动势系数。

由此电磁转矩可表示为

$$T_e=\frac{60}{\pi}K_e\Phi i_s=K_T\Phi i_s \tag{3-36}$$

式中，K_T 为转矩系数。

(3) 运动方程

在忽略转动时的黏滞系数的情况下，无刷直流电动机的运动方程可写为

$$T_e-T_L=J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \tag{3-37}$$

式中，T_e 为发动机的额定转矩；T_L 为负载转矩；J 为电动机轴上转动惯量的总和。

(4) 机械特性

无刷直流电动机的机械特性为

$$n=\frac{U}{K_e}-\frac{2r}{K_T K_e}T_e \tag{3-38}$$

无刷直流电动机与有刷直流电动机的机械特性类似，通过调节电枢电流可以实现转矩控制，同时通过调节电源电压可以实现无刷直流电动机的调速控制。

3.3.5 无刷直流电动机的控制

1. 无刷直流电动机的控制方法

按照获取转子位置信息的方法划分，无刷直流电动机的控制方法可以分为有位置传感器控制和无位置传感器控制两种。

(1) **有位置传感器控制**。有位置传感器控制方法是指在无刷直流电动机定子上安装位置传感器来检测转子旋转过程中的位置，将转子磁极的位置信号转换为电信号，为电

子换相电路提供正确的换相信息，以此控制电子换相电路中的功率开关管的开关状态，保证电动机各相按顺序导通，在空间形成跳跃式的旋转磁场，驱动永磁转子连续不断地旋转。

无刷直流电动机中常用的位置传感器有霍尔元件位置传感器、磁敏晶体管位置传感器、光电式位置传感器等。

① 霍尔元件位置传感器。用霍尔元件作为位置传感器时，将其安装在电动机气隙内的定子侧。随着转子的转动，穿过霍尔元件的磁场强度会发生周期性变化。霍尔元件的输出电动势也会相应地发生变化。通过检测这个电动势就可以了解电动机转子的位置。霍尔元件成本低，性能优良，是最常用的一种电动机转子位置传感器。

② 磁敏晶体管位置传感器。磁敏晶体管是一种对它所在位置的磁场强度大小敏感的半导体元件，常见的有磁敏二极管和磁敏晶体管。以磁敏二极管为例，当给它加以正向偏置时，受外界磁场强度的影响，它的正向压降变化很显著。把磁敏二极管用作电动机转子位置传感器时，将其安装在气隙内定子侧。转子旋转引起穿过磁敏二极管的磁场强度发生变化，磁敏二极管的正向压降也随之发生变化，检测这个压降就可以确定电动机的转子位置。

③ 光电式位置传感器。光电式位置传感器是利用光电效应制成的。它与电动机同轴安装，由跟随电动机转子一起旋转的遮光板和固定不动的光源及光敏管组成，在遮光板上开有约120°电角度的透光缝。当转子旋转到一定的位置，遮光板挡住光源时，光敏管只能通过“暗电流”。当透光缝转到光源与光敏管之间时，光敏管中流过“亮电流”。这样，遮光板随着转子旋转的位置信息就反映在了光敏管中的电流上，检测光敏管流过的电流就可以得到电动机的转子位置信号。光电式位置传感器性能较稳定，但对使用环境的要求较高。

有位置传感器，控制方法和控制电路都比较简单，控制系统成本低，因而有位置传感器控制得到了比较广泛的应用。然而，有位置传感器，控制方法有其自身不可避免的许多缺点。由于位置传感器的存在，电动机结构变得复杂，增加了电动机成本；电动机与控制部分的连接线增加，降低了系统的可靠性，而且维修困难；在高温、冷冻、湿度大、有腐蚀物质、空气污浊等工作环境及振动、高速运行等工作条件下，都会降低传感器的可靠性；若传感器损坏，还可能发生连锁反应引起电子换相器等器件的损坏；传感器的安装精度对电动机的运行性能有较大的影响，相对增加了生产工艺的难度。

由此可见，虽然有位置传感器控制简单、方便，但在很多特殊场合，无法使用传感器检测转子位置。因此位置传感器的存在，在一定程度上限制了无刷直流电动机的进一步推广和应用。

（2）**无位置传感器控制**。无刷直流电动机的无位置传感器控制，不需安装位置传感器，使用场合广，相对于有位置传感器控制有较大的优势，因此，无刷直流电动机的无位置传感器控制已成为近年来研究的热点。

无刷直流电动机的无位置传感器控制中，不直接使用转子位置传感器，但在电动机运转过程中，仍然需要转子位置信号，以控制电动机换相。因此，如何通过软硬件间接获得可靠的转子位置信号，成为无刷直流电动机无位置传感器控制的关键。为此，国内外的研究人员在这方面进行了大量的研究工作，提出了多种转子位置信号检测方法，大多是利用检测定子电压、电流等容易获取的物理量实现转子位置的估算。归纳起来，可以分为反电动势法、电感法、状态观测器法、电动机方程计算法、人工神经网络法等。

反电动势法是通过检测电动机输出的反电动势来确定转子的位置，使电动机正确换相。现在的无位置传感器控制中，大部分使用的是反电动势法。这里仅介绍此方法。

按照对反电动势处理方法的不同，反电动势法又分为反电动势过零检测法、反电动势积分法、反电动势三次谐波检测法等。

① 反电动势过零检测法。在无刷直流电动机中，定子绕组的反电动势为梯形波，并且正负交变；绕组反电动势发生过零后，延迟对应于30°电角度的时间，即为电动机换相时刻。因此，只要检测到各相反电动势的过零点，即可获知转子的若干个关键位置，实现无位置传感器无刷直流电动机换相控制。

通常，无刷直流电动机运行中，在任意时刻电子换相器中总有一相的功率管器件全部关断，处于悬空状态，绕组反电动势的过零点就发生在该相绕组悬空的时间段内。此时，只要检测绕组中相电压的变化，就可检测到反电动势的过零点。这种通过检测无刷直流电动机相电压获得反电动势的方法，由于成本或工艺的原因，大多数无刷直流电动机不引出绕组中点。反电动势过零检测法主要通过检测电动机端电压获取反电动势过零点。其方法有低通滤波法、脉宽调制关断检测法、数字计算法等。

反电动势过零检测法是目前应用最广泛的无位置传感器无刷直流电动机控制方法。

② 反电动势积分法。这种检测方法是通过电动机不导通相反电动势的积分来获取位置信息的。当截止相反电动势过零时开始对其绝对值积分，当积分值达到一个设定的阈值时停止积分，便获得了转子位置，并对应于定子绕组的换流时刻。该方法对于开关噪声不敏感，积分阈值可以根据转速信号自动调节，低速时反电动势信号很弱，也需要采取开环起动方式。

有人提出了相似的反电动势逻辑电平积分比较法，将两路导通相反电动势进行过零比较处理，得到逻辑电平后再对两路逻辑电平进行积分，这两个积分值之间的关系实际上反映了相位关系，从而确定出转子的磁极位置。这种方法只需检测非导通相反电动势的极性，有利于改善低速性能，调速范围可以达到10～1500r/min。

③ 反电动势三次谐波检测法。无刷直流电动机的梯形波反电动势包含基波及其他高次谐波分量。将三相反电动势相加，可以消去基波分量及五次谐波、七次谐波分量，剩下三次谐波及其他高次谐波分量。无论转速及负载的情况如何变化，三次谐波分量和转子磁通都保持固定的相位关系，并且不受电子换相器开关噪声的影响，因此是一种可靠的检测方法。

三次谐波频率是基波频率的3倍，因此，相对于一般的反电动势检测方法，反电动势三次谐波检测方法可以检测更低的转速；电动机起动也相对容易。应用反电动势三次谐波检测法只需要一个很小的滤波器就可以，因而相比反电动势过零点检测法，反电动势三次谐波检测法受滤波延迟的影响较小，可以在更宽的调速范围内具有很好的性能。

④ 通过续流二极管间接检测反电动势。在三相、星形、六状态的无刷直流电动机中，当采用斩波方式对电动机进行控制时，非导通相的反电动势将使续流二极管中有电流流过，并且续流二极管在两次换相的中点时刻开始导通或者停止导通，这恰好是非导通相反电动势的过零点。因此，可以通过检测非导通相的续流二极管是否导通间接地检测反电动势的过零点。这种检测方法比直接检测反电动势过零点精确，因而可以在一个很宽的转速范围内有效，包括很低的转速，但不能为零。由于可以在很低的转速时工作，因此这种方法也使得电动机起动要比其他方法简单。

这种方法最大的缺点是必须提供六个用于比较电路的隔离电源。

2. 无刷直流电动机的控制技术

随着电动机及驱动系统的发展，控制系统趋于智能化和数字化，使得许多较复杂的控制技术得以实现。这些控制技术的实现又进一步推动了无刷直流电动机在各个工业领域的应用，为无刷直流电动机的发展开辟了广阔的前景。

目前，应用于无刷直流电动机控制系统的控制技术主要有PID(比例积分微分)控制技术、模糊控制技术和神经网络控制技术等。

(1) **PID控制技术**。在古典控制理论中，应用最成功的是PID控制。PID控制是一种在工业生产中广泛应用的常规控制算法，属于线性控制。这种控制技术的最大优点是结构简单，使用方便。该控制技术由于其简单实用而被广大工程技术人员所熟悉。

传统的无刷直流电动机调速通常采用PID控制，因为算法简单，参数调整方便，故具有较好的控制精度。

(2) **模糊控制技术**。所谓模糊控制，是指在控制方法上应用模糊集理论、模糊语言变量及模糊逻辑推理来模拟人的模糊思维方法，用计算机实现与操作者相同的控制。模糊控制技术不依赖于精确的数学模型，对参数变换不敏感，适用性强，具有很好的鲁棒性。它通过把专家的经验或手动操作人员长期积累的经验总结成若干条规则，采用简便、快捷、灵活的手段来完成那些用经典和现代控制理论难以完成的自动化和智能化的目标。

模糊控制技术应用于无刷直流电动机的调速系统，可以克服PID控制器在工作环境不稳定，负载或参数变化时，控制效果不佳的问题。

另外，模糊控制与PID控制结合可以设计出性能更好的控制器。

(3) **神经网络控制技术**。神经网络是模拟人脑神经细胞的神经元广泛互联而成的网络。由于神经网络辨识电动机参数不依赖于精确的数学模型，具有很高的控制精度，因而在模式识别、参数辨识领域得到了广泛的应用。

目前已有神经网络模糊PID控制器应用于无刷直流电动机调速系统的实例。该系统利用神经网络所具有的任意非线性表示能力，通过对系统的性能学习来实现具有最佳组合的PID控制，同时又针对神经网络控制器在大误差范围内电流过早饱和，不利于响应快速性的缺点，加入了模糊控制来改善性能，提高了响应的快速性。

3. 无刷直流电动机的控制器

无刷直流电动机的控制器主要有专用集成电路控制器、微处理器(又称单片机)和DSP(Digital Signal Processing，数字信号处理)控制器三种方式。

对于专用集成电路，现在几乎所有先进工业国家的半导体商，都能提供自己开发的电动机控制专用集成电路。但使用时灵活性较差，受到的限制过多。

现在无刷直流电动机控制器大多采用微处理器来实现，但微处理器的处理能力有限，特别是需要处理的数据量大、实时性和精度要求高时，微处理器往往不再能满足要求。

DSP控制器能够对输入输出数据进行高速处理(其运算速度比微处理器快一个数量级)，特别是DSP控制器还提供了高度专业化的指令集，提高了数字滤波器的运算速度，这使得它在控制器的规则实施、矢量控制和矩阵变换方面具有很大的优势。若要无刷直流电动机完成一些较复杂的控制功能，如电压电流双闭环调速、转子电流正弦波驱动，则必

须要用运动控制专用微处理器。运动控制专用微处理器都是将电动机控制所需的外围功能电路集成在一个DSP芯片内，其具有体积小、结构紧凑、易于使用、可靠性高的特点，运算速度及处理能力大大增强，确保了系统具有更优越的控制性能。因此，采用DSP控制器作为控制芯片将是今后的发展方向。另外，采用DSP控制器的专用集成块还可以降低系统对传感器等外围器件的要求，通过复杂的算法可以达到同样的控制性能，降低了成本，提高了可靠性。

4. 基于DSP控制器的无刷直流电动机无位置传感器控制

Texas Instrument(TI)公司的240x系列DSP控制器是专为电动机控制设计的，它把高性能的DSP控制器内核和微控制器的外围集成在同一块芯片上，替代了传统的微控制器单元和多芯片设计，具有传统16位微处理器及控制器无法比拟的运算性能。基于TMS320LF2407的无刷直流电动机的无位置传感器控制系统硬件结构如图3.20所示。

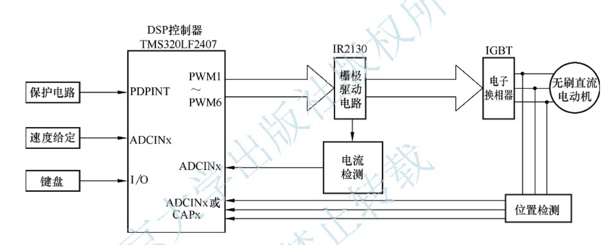


图3.20 基于TMS320LF2407的无刷直流电动机的无位置传感器控制系统硬件结构

采用“端电压法”检测反电动势过零点，得到三路位置信号，构成位置闭环来控制电枢绕组的换相。同时，通过记录两次换相的时间间隔可计算电动机的转速。反电动势过零点的比较既可以通过软件实现，也可以通过硬件电路实现，不同的方法使用DSP控制器的不同端口。

由DSP控制器输出六路PWM信号(PWM1～PWM6)来控制电子换相器的开关管，PWM波的输出受换相信号和转速调节器的控制。

电流信号通过串联在主回路中的采样电阻获得，电流信号一方面输入DSP控制器的ADCINx(x=1，2，3)引脚，通过A/D转换单元转换为数字信号，用于电流闭环调节；另一方面用于过电流保护。

反电动势过零点检测方程为

$$\begin{cases} e_a = u_{a0} - u_N = u_{a0} - (u_{a0} + u_{b0} + u_{c0})/3 \\ e_b = u_{b0} - u_N = u_{b0} - (u_{a0} + u_{b0} + u_{c0})/3 \\ e_c = u_{c0} - u_N = u_{c0} - (u_{a0} + u_{b0} + u_{c0})/3 \end{cases} \tag{3-39}$$

可见，只要检测出电动机的端电压和中性点电压，然后进行比较，就可以得到反电动势的过零点。

电压比较可以采用两种不同的方法：利用硬件电路(电压比较器)进行比较和利用软件进行比较。采用硬件电压比较器检定电动势过零点需要引进一个在整个工作频率范围内都具有恒定相移的无源低通滤波器，而设计出完全满足这种要求的滤波器比较困难。为此，可以利用DSP控制器强大的运算处理能力，在程序中采用软件滤波的方法，同时反电动势过零点的检定及过零点相移30°电度角换相等处理都由软件实现。

如图3.21所示，采用分压电阻检测三相端电压，检测到的电压信号经过隔离、放大后分别送到TMS320LF2407的ADCIN01～ADCIN03通道。图中，HCPL7800为高共模抑制比隔离运算放大器，双电源供电，具有良好的线性度，在高噪声环境下也能保证较高的精度和稳定性。TMS320LF2407的工作电压为3.3V，故采用集成运算放大器LF353将电压信号转换为0～3.3V的单极性电压信号。

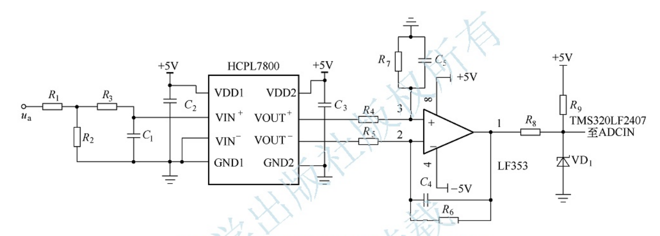


图3.21　端电压检测电路及其与DSP控制器的连接

3个电压信号转换为数字量后，通过软件检定反电动势过零点，并经30°电角度移相确定换相点，可构成图3.22所示的双闭环控制系统。

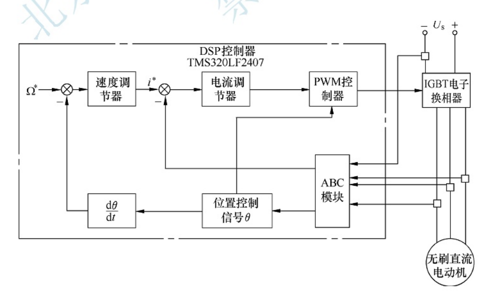


图3.22　基于320LF2407的无刷直流电动机无位置传感器双闭环控制系统控制原理

30°电角度移相的估计与转速计算的原理相同。因为电动机每隔60°电角度换相一次，则两次换相发生的时间间隔的一半($\Delta t/2$)就是30°电角度移相对应的延迟时间。

为保证系统中功率电路安全可靠地工作，DSP 控制器提供了功率驱动保护中断 PDPINT 引脚。当该 PDPINT 引脚被置为低电平时，DSP 控制器内部定时器立即停止计数，所有 PWM 引脚全部呈高阻态。利用它可方便地实现系统的各种保护功能。

故障处理电路原理如图 3.23 所示。过电压、欠电压、过电流、过热等各种故障信号一方面输入或非门(如 CD4078)，另一方面送入 DSP 控制器进行判别。当任一种故障发生时，或非门输出一个低电平信号，向 DSP 控制器申请故障中断，封锁 PWM 输出，实现系统的保护功能。同时通过 LED 显示器显示相应的故障信号。过电压、欠电压和过电流检测都是通过比较器实现的。

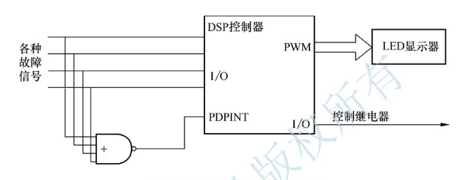


图 3.23 故障处理电路原理

此外，在实际系统中，当故障发生时还可通过 DSP 控制器的 I/O 端口控制继电器，切断系统的主回路。

基于 TMS320LF2407 的无刷直流电动机无位置传感器控制软件框图如图 3.24 所示。

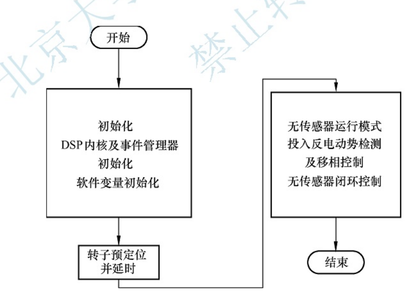


图 3.24 基于 TMS320LF2407 的无刷直流电动机无位置传感器控制软件框图

系统软件主要由以下模块组成。

(1) 初始化模块：主要完成系统时钟、看门狗、I/O 端口、系统中断、事件管理器的各个控制寄存器及其中断等的设置，以及软件中各变量的初始化和辅助寄存器的设置等功能。

(2) 启动控制模块：完成转子预定位、开环启动等功能。

(3) A/D转换模块：利用DSP控制器内部的A/D转换单元完成相电流和端电压的A/D转换。

(4) 转子位置估算模块：根据端电压的值检测非导通相的反电动势过零点。由于反电动势过零点并不是换相点，因此还需要根据记录的上一个60°电角度区间对应的时间间隔完成30°电角度移相功能。同时，如同在有位置传感器控制中捕获位置信号的上升沿、下降沿一样，在软件中也可以根据非导通相端电压与中性点电压的比较值的符号(大于0或小于0)，确定反电动势过零点的具体位置，从而确定换相逻辑。

(5) 换相控制模块：根据换相逻辑控制功率开关管的换相。

(6) PWM波形发生模块：PWM波形生成主要是通过设置TMS320LF2407事件管理模块的PWM波形发生器，将定时器1设置成连续升序计数模式，计数周期根据PWM周期设成50μs，对应20kHz频率。然后在每一个采样流程根据转速环转速比较值对三个全比较单元的比较寄存器值进行刷新。同时，在该模块，通过查表法，获得当前换相指针所对应的ACTR(全比较动作控制寄存器)值，并送到ACTR寄存器。完成对PWM1～PWM6引脚状态的定义。

(7) 数字PID模块：对转速误差和电流误差进行调解，控制PWM占空比。

(8) 系统故障保护模块：当系统出现故障时，一方面由硬件立刻封锁主开关的驱动信号；另一方面，故障信号输入DSP控制器的I/O端口，DSP控制器进入故障处理程序。系统先经过一定的延时以防止误报警，如果延时时间到，系统还有报警信号，则通过I/O端口控制继电器，切断主电路并显示故障类型。

3.4 异步电动机

异步电动机又称感应电动机，是由气隙旋转磁场与转子绕组感应电流相互作用产生电磁转矩，从而实现电能转化为机械能的一种交流电动机。

异步电动机的种类很多，最常见的分类方法是按转子结构和定子绕组相数分类。按照转子结构，异步电动机可分为笼型异步电动机和绕线型异步电动机；按照定子绕组相数，异步电动机可分为单相异步电动机、两相异步电动机和三相异步电动机。异步电动机是各类电动机中应用最广、需求量最大的一种。在电动汽车中，主要使用笼型异步电动机。下面介绍的异步电动机就是指三相笼型异步电动机。

3.4.1 异步电动机的结构与特点



【永磁同步电动机和异步电动机】

1. 异步电动机的结构

异步电动机主要由静止的定子和旋转的转子两大部分组成，定子和转子之间存在气隙，此外，还有端盖、轴承、机座和风扇等部件。图3.25所示为三相异步电动机的典型结构。

(1) **定子**。异步电动机的定子由定子铁心、定子绕组和机座构成。

① 定子铁心。定子铁心是电动机磁路的一部分，并在其上放置定子绕组。定子铁心一般由0.35～0.5mm厚、表面具有绝缘层的硅钢片冲制、叠压而成，在铁心的内圆冲有

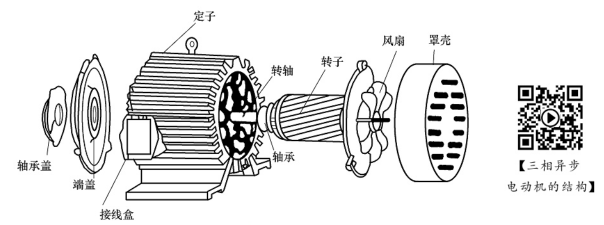


图 3.25 三相异步电动机的典型结构

均匀分布的槽，用以嵌放定子绕组。定子铁心槽型有半闭口型槽、半开口型槽和开口型槽三种。

② 定子绕组。定子绕组是电动机的电路部分，通入三相交流电，产生旋转磁场。定子绕组由三个在空间互隔120°电角度、对称排列的结构完全相同的绕组连接而成。这些绕组的各个线圈按一定规律分别嵌放在定子槽内。

③ 机座。机座主要用于固定定子铁心与前后端盖，以支承转子，并起防护、散热等作用。机座通常为铸铁件，大型异步电动机机座一般用钢板焊成，微型电动机的机座采用铸铝件。封闭式电动机的机座外面有散热筋以增加散热面积，防护式电动机的机座两端端盖开有通风孔，使电动机内外的空气可直接对流，以利于散热。

(2) **转子**。异步电动机的转子由转子铁心、转子绕组和转轴组成。

① 转子铁心。转子铁心也是电动机磁路的一部分，并在铁心槽内放置转子绕组。转子铁心所用材料与定子一样，由0.5mm厚的硅钢片冲制、叠压而成。硅钢片外圆冲有均匀分布的孔，用来安置转子绕组。通常用定子铁心冲落后的硅钢片内圆来冲制转子铁心。一般小型异步电动机的转子铁心直接压装在转轴上，大、中型异步电动机(转子直径为300～400mm)的转子铁心则借助于转子支架压在转轴上。

② 转子绕组。转子绕组是转子的电路部分。它的作用是切割定子旋转磁场产生感应电动势及电流，并形成电磁转矩而使电动机旋转。转子绕组分为笼式转子绕组和绕线式转子绕组。

③ 转轴。转轴用于固定和支承转子铁心，并输出机械功率。转轴一般使用中碳钢制成。

(3) **气隙**。异步电动机定子与转子之间有一小的间隙，称为电动机气隙。气隙的大小对异步电动机的运行性能有很大影响。中小型异步电动机的气隙一般为0.2～2mm。功率越大，转速越高，气隙尺寸越大。

2. 异步电动机的特点

异步电动机的基本特点是，转子绕组不需与其他电源相连，其定子电流直接取自交流电力系统。与其他电动机相比，异步电动机的结构简单，制造、使用、维护方便，运行可靠性高，质量轻，成本低。以三相异步电动机为例，与同功率、同转速的直流电动机相比，前者质量只及后者的1/2，成本仅为1/3。异步电动机还容易按不同环境条件的要求，

派生出各种系列产品。它还具有接近恒速的负载特性，能满足大多数工农业生产机械拖动的要求。

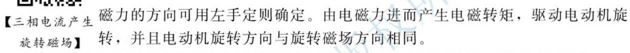
异步电动机的局限性是，它的转速与其旋转磁场的同步转速有固定的转差率，因而调速性能较差，在要求有较宽广的平滑调速范围的使用场合，不如直流电动机经济、方便。此外，异步电动机运行时，从电力系统吸取无功功率以励磁，这会导致电力系统的功率因数变坏。因此，在大功率、低转速场合不如用同步电动机合理。

3.4.2 异步电动机的工作原理

图 3.26 所示为异步电动机的工作原理。

当异步电动机的三相定子绕组通入三相交流电后，将产生一个旋转磁场，该旋转磁场切割转子绕组，从而在转子绕组中产生感应电动势，电动势的方向由右手定则来确定。由于转子绕组是闭合通路，转子中便有电流产生，电流方向与电动势方向相同，而载流的转子导体在定子旋转磁场作用下将产生电磁力，电磁力的方向可用左手定则确定。由电磁力进而产生电磁转矩，驱动电动机旋转，并且电动机旋转方向与旋转磁场方向相同。

【三相电流产生旋转磁场】



异步电动机的转子转速不等于定子旋转磁场的同步转速，这是异步电动机的主要特点。

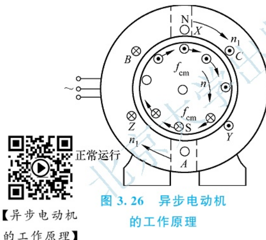


图 3.26 异步电动机的工作原理

【异步电动机的工作原理】

如果电动机转子轴上带有机械负载，则负载被电磁转矩拖动而旋转。当负载发生变化时，转子转速也随之发生变化，使转子导体中的电动势、电流和电磁转矩发生相应变化，以适应负载需要。因此，异步电动机的转速是随负载变化而变化的。

异步电动机的转子转速与定子旋转磁场的同步转速之间存在转速差，它的大小决定着转子电动势及其频率的大小，直接影响异步电动机的工作状态。通常将转速差与同步转速的比值用转差率表示，即

$$s=\frac{n_1-n}{n_1} \tag{3-40}$$

式中，s 为转差率；n_1 为定子旋转磁场的同步转速；n 为转子转速。

转差率是异步电动机运行时的一个重要物理量。异步电动机运行时，转差率取值范围为 $0<s<1$。在额定负载条件下运行时，一般额定转差率 $s=0.01\sim0.06$。

3.4.3 异步电动机的运行特性

1. 异步电动机的工作特性

异步电动机的工作特性是指电动机在保持额定电压和额定频率不变的情况下，电动机的转速、电磁转矩、定子电流、效率和功率因数随输出功率变化的特性。一般通过负载试验来测取。图 3.27 所示是异步电动机的工作特性曲线。

工作特性是异步电动机的重要特性。转速特性和转矩特性关系到电动机与机械负载匹配的合理性；定子电流特性可以表明电动机的发热情况，关系到电动机运行的可

(4) 不考虑频率和温度变化对绕组电阻的影响。

无论电动机转子是绕线式还是笼式的，都将它等效成线转子，并折算到定子侧，折算后的每相绕组匝数都相等。这样，实际电动机绕组就等效成图 3.30 所示的三相异步电动机的物理模型。图中，定子三相绕组轴线 A、B、C 在空间是固定的，以 A 轴为参考坐标轴；转子绕组轴线 a、b、c 随转子旋转，转子 a 轴和定子 A 轴间的电角度 θ 为空间位移变量。规定各绕组电压、电流、磁链的正方向符合电动机惯例和右手螺旋法则。这时，异步电动机的数学模型由电压方程、磁链方程、转矩方程和运动方程组成。

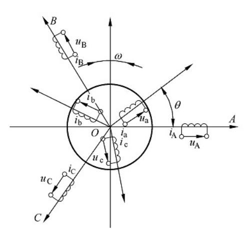


图 3.30 三相异步电动机的物理模型

(1) 电压方程

三相定子绕组的电压方程为

$$
\begin{aligned}
u_A &= i_A R_1 + \frac{d\Psi_A}{dt} \\
u_B &= i_B R_1 + \frac{d\Psi_B}{dt} \\
u_C &= i_C R_1 + \frac{d\Psi_C}{dt}
\end{aligned} \tag{3-41}
$$

三相转子绕组折算到定子侧后的电压方程为

$$
\begin{aligned}
u_a &= i_a R_2 + \frac{d\Psi_a}{dt} \\
u_b &= i_b R_2 + \frac{d\Psi_b}{dt} \\
u_c &= i_c R_2 + \frac{d\Psi_c}{dt}
\end{aligned} \tag{3-42}
$$

式中，u_A、u_B、u_C、u_a、u_b、u_c 分别为定子和转子相电压的瞬时值；i_A、i_B、i_C、i_a、i_b、i_c 分别为定子和转子相电流的瞬时值；Ψ_A、Ψ_B、Ψ_C、Ψ_a、Ψ_b、Ψ_c 分别为各相绕组的磁链；R_1、R_2 分别为定子和转子绕组的电阻。

上述各量度已折算到定子侧。将电压方程写成矩阵形式，并以微分算子 P 代替微分符号$\frac{d}{dt}$，则有

$$
\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \\ u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \\ \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \tag{3-43}
$$

（2）磁链方程

每个绕组的磁链是它本身的自感磁链和其他绕组对它的互感磁链之和，因此，六个绕组的磁链可表示为

$$\begin{bmatrix}\Psi_A\\ \Psi_B\\ \Psi_C\\ \Psi_a\\ \Psi_b\\ \Psi_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Aa} & L_{Ab} & L_{Ac}\\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Ba} & L_{Bb} & L_{Bc}\\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Ca} & L_{Cb} & L_{Cc}\\ L_{aA} & L_{aB} & L_{aC} & L_{aa} & L_{ab} & L_{ac}\\ L_{bA} & L_{bB} & L_{bC} & L_{ba} & L_{bb} & L_{bc}\\ L_{cA} & L_{cB} & L_{cC} & L_{ca} & L_{cb} & L_{cc}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_A\\ i_B\\ i_C\\ i_a\\ i_b\\ i_c\end{bmatrix} \tag{3-44}$$

式中，对角线元素 L_{AA}、L_{BB}、L_{CC}、L_{aa}、L_{bb}、L_{cc} 是各有关绕组的自感，其余各项是绕组间的互感。

根据磁链方程式(3-44)和电压方程式(3-43)，可以得到展开后的电压方程为

$$u=Ri+P(Li)=Ri+L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}t}i=Ri+L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+\omega\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\theta}i \tag{3-45}$$

式中，$L\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ 项属于电磁感应电动势中的脉变电动势(或称变压器电动势)；$(\mathrm{d}L/\mathrm{d}t)\omega i$ 项属于电磁感应电动势中与转速 ω 成正比的旋转电动势。

（3）运动方程

在一般情况下，电气传动系统的运动方程为

$$T_e=T_L+\frac{J}{p}\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}+\frac{D}{p}\omega+\frac{K}{p}\theta \tag{3-46}$$

式中，T_L 为负载转矩；J 为机组的转动惯量；D 为与转速成正比的负载转矩阻尼因数；K 为扭转弹性转矩因数；p 为极对数。

对于恒转矩负载，$D=0$，$K=0$，则

$$T_e=T_L+\frac{J}{p}\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \tag{3-47}$$

（4）转矩方程

按照机电能量转换原理，可求出电磁转矩 T_e 的表达式为

$$T_e=pL_{m1}[(i_Ai_a+i_Bi_b+i_Ci_c)\sin\theta+(i_Ai_b+i_Bi_c+i_Ci_a)\sin(\theta+120°)+(i_Ai_c+i_Bi_a+i_Ci_b)\sin(\theta-120°)] \tag{3-48}$$

应该指出，式(3-48)是在磁路为线性、磁动势在空间按正弦分布的假定条件下得出的，但对定子、转子电流的波形未做出任何假定，式中 i 都是瞬时值。因此，此电磁转矩公式同样适应于由变压变频器供电的三相异步电动机调速系统。

（5）三相异步电动机的数学模型

将前述式子归纳起来，便构成在恒转矩负载下三相异步电动机的多变量非线性数学模型，即

$$\begin{aligned}u&=Ri+L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+\omega\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\theta}i\\ T_e&=T_L+\frac{J}{p}\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}\\ \omega&=\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\end{aligned} \tag{3-49}$$

3.4.5 异步电动机的控制

异步电动机是一个多变量(多输入输出)系统，其中变量电压(电流)、频率、磁通、转速之间又相互影响，所以异步电动机又是强耦合的多变量系统。如何对这样一个非线性、多变量、强耦合的复杂系统进行有效控制，成为研究的重点。把经典理论与现代控制理论相结合，已经形成了诸多有效的控制策略与方法。

目前对异步电动机的调速控制主要有恒压频比开环控制、转差控制、矢量控制及直接转矩控制等。

恒压频比开环控制实际上只控制了电动机的磁通而没有控制电动机的转矩，采用这样的控制系统对异步电动机来讲根本谈不上控制性能，通常只用于对调速性能要求一般的通用变频器上。

转差控制是根据异步电动机电磁转矩和转差频率的关系来直接控制电动机的转矩的，可以在一定的转差频率范围内，一定程度上通过调节转差来控制电动机的电磁转矩，从而改善调速系统的控制性能，但其控制理论是建立在异步电动机的稳态数学模型基础上的，适合于电动机转速变化缓慢或者对动态性能要求不高的场合。

这里主要介绍异步电动机的矢量控制和直接转矩控制。

1. 矢量控制

矢量控制理论采用矢量分析的方法来分析交流电动机内部的电磁过程，是建立在交流电动机的动态数学模型基础上的控制方法。它模仿对直流电动机的控制技术，将交流电动机的定子电流解耦成互相独立的产生磁链的分量和产生转矩的分量，分别控制这两个分量就可以实现对交流电动机的磁链控制和转矩控制的完全解耦，从而达到理想的动态性能。

(1) 异步电动机矢量控制方式的选择。异步电动机矢量控制是基于磁场定向的方法，其调速控制系统的方式比较复杂，常用的控制策略有以下几种。

① 转子磁场定向矢量控制原理。交流电动机的转矩与定转子旋转磁场及其夹角有关，要控制好转矩，必须精确检测和控制磁通，在此种控制方式中，检测出定子电流的 d 轴分量，就可以观测出转子磁链的幅值。当转子磁链恒定时，电磁转矩和电流的 q 轴分量成正比，忽略反电动势引起的交叉耦合，可以由电压方程 d 轴分量控制转子磁通，q 轴分量控制转矩，目前大多数变频系统是使用此种控制方法的。它实现了系统的完全解耦，但是其最大的缺点是转子磁通的观测受转子时间常数的影响。

② 转差率矢量控制原理。如果使电动机的定子、转子或气隙磁场中的一个保持不变，电动机的转矩就主要由转差率决定。因此，此方法主要考虑转子磁通的稳态方程，从转子磁通直接得到定子电流 d 轴分量，通过对定子电流的有效控制，形成了转差矢量控制，避免了磁通的闭环控制，不需要实际计算转子的磁链，用转差率和测量的转速相加后积分来计算磁通相对于定子的位置，但此种方法主要应用在低速系统中，而且系统性能同样受转子参数变化影响。

③ 气隙磁场定向矢量控制原理。除了转子磁场的定向矢量控制以外，还有一些控制系统使用的是气隙磁场的定向矢量控制。此种方法比转子磁场的定向矢量控制复杂，但其利用了气隙磁通易于观测的优点，保持气隙磁通的恒定，从而使转矩与 q 轴电流成正比，

直接对 q 轴电流控制，达到控制电动机的目的。

④ 定子磁场定向矢量控制原理。由于转子磁通的检测容易受电动机参数影响，气隙磁通的检测需要附加一些额外的检测器件等弊端的存在，国内外兴起了定子磁场的定向矢量控制方法。此种方法是通过保持定子磁通不变，控制与转矩成正比的 q 轴电流，从而控制电动机。但是，此种方法和气隙磁场的定向矢量控制一样，需要对电流进行解耦，而且以定子电压作为测量量，容易受到电动机转速的影响。

(2) 异步电动机矢量控制的特点。矢量控制变频器可以分别对异步电动机的磁通和转矩电流进行检测和控制，自动改变电压和频率，使指令值和检测实际值达到一致，从而实现变频调速，大大提高电动机控制静态精度和动态品质，转速精度约等于0.5%，转速响应也较快。采用矢量控制变频器的异步电动机的矢量控制可以得到控制结构简单，可靠性高的效果，主要表现在以下几个方面。

① 可以从零转速起进行速度控制，因此调速范围很宽广。

② 可以对转矩实行较精确的控制。

③ 系统的动态响应速度很快。

④ 电动机的加速度特性很好。

带速度传感器矢量控制变频器的异步电动机的闭环变频调速技术性能虽然较好，但是需要在异步电动机轴上安装速度传感器，使异步电动机结构坚固、可靠性高的特点打了折扣。而且在某些情况下，由于电动机本身或环境的限制无法安装速度传感器。另外，系统增加了反馈电路和其他辅助环节，也增加了出故障的概率。因此，对于调速范围、转速精度和动态品质要求不是特别高的场合，往往采用无速度传感器矢量变频式的开环控制异步电动机变频调速系统。

2. 直接转矩控制

直接转矩控制是将电动机输出转矩作为直接控制对象，通过控制定子磁场向量控制电动机转速。它不需要复杂的坐标变换，也不需要依赖转子数学模型，只是通过控制PWM型逆变器的导通和切换方式，控制电动机的瞬时输入电压，改变磁链的旋转速度来控制瞬时转矩，使系统性能对转子参数呈现鲁棒性。并且这种方法被推广到了弱磁调速范围。逆变器的脉宽调制采用电压空间向量控制方式，性能优越。但同时不可避免地出现转矩脉动，调速性能降低的问题。此外，该方法对逆变器开关频率提高的限制较大，定子电阻对电动机低速性能也有较大影响，如在低速区，定子电阻的变化引起的定子电流和磁链的畸变，以及转矩脉动、死区效应和开关频率等问题。

(1) 异步电动机直接转矩控制系统的结构与原理。直接转矩控制系统控制原理如图3.31所示。该系统主要包括磁链观测器、磁链调节器、转矩观测器、转矩调节器和转速调节器等。其中磁链观测器对磁链观测的准确性对于整个控制系统的稳定性有着举足轻重的作用，而开关策略和磁链、转矩调节是先进控制算法的核心部分。

① 磁链观测器。磁链观测器的准确性，可以说是直接转矩控制技术实现的关键。定子磁链无论是幅值还是相位，若出现较大的误差，控制性能都会变坏，或者出现不稳定。解决磁链问题的较通用的方法是采用间接测量的方法，即通过测量的定子电压、定子电流和转速等建立定子磁链的观测模型，在控制中实时、准确地算出定子磁链的幅值和相位。常用的磁链观测模型有基于定子电压和电流的磁链观测模型，基于定子电流和转速的磁链

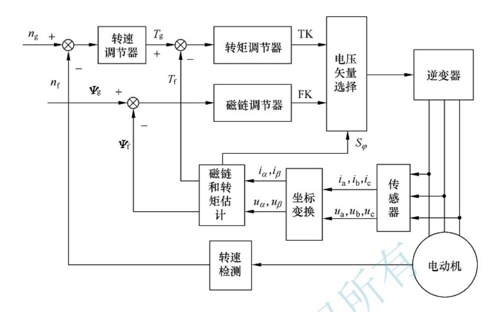


图 3.31　直接转矩控制系统控制原理

观测模型，以及基于定子电压和转速的磁链观测模型。

② 磁链调节器。控制定子磁链在给定值的附近变化，输出磁链控制信号。

③ 转矩观测器。转矩观测器的任务是用状态检测转矩模型，完成电磁转矩的计算。

④ 转矩调节器。转矩调节器的任务是实现对转矩的直接控制。直接转矩控制的名称由此而来。为了控制转矩，转矩调节必须具备两个功能：一个功能是转矩调节器直接调节转矩；另一个功能是在调节转矩的同时，控制定子磁链的旋转方向，以加强转矩的调节。

⑤ 转速调节器。在直接转矩控制系统中，主要的是通过控制电压空间矢量来控制转速，从而控制转矩。而转矩的控制又成为转速控制的基础，故在系统中应用闭环控制。闭环控制系统具有简洁、直观、有效的特点。从传感器中引出转速反馈信号与转速给定信号进行比较后送入 PI 调节器，调节器的输出直接作为转矩的给定值，便可以实现转速的闭环控制。

控制过程如下：通过传感器检测得到定子电流、电压的 $\alpha-\beta$ 分量，然后通过磁链观测器和转矩观测器分别获得定子磁链的实际值 Ψ_f 和转矩的实际值 T_f，将定子磁链的实际值 Ψ_f 与给定值 Ψ_S 输入磁链调节器，通过滞环比较器实现磁链的自控制。转速给定值 n_g 与通过速度测量得到的转速 n_f 之差经过转速调节器得到转矩给定值 T_g，将转矩的实际值 T_f 与给定值 T_g 输入转矩调节器，实现转矩的自控制。

(2) 直接转矩控制的特点。与矢量控制相比，直接转矩控制有以下主要特点。

① 直接转矩控制直接在定子坐标系下分析交流电动机的数学模型，控制电动机的磁链和转矩。它不需要将交流电动机与直流电动机做比较、等效和转化；既不需要模仿直流电动机的控制，也不需要为解耦而简化交流电动机的数学模型。它省掉了矢量旋转变换等复杂的变换和计算。因此，它所需要的信号处理工作特别简单，所用的控制信号使观察者对于交流电动机的物理过程能够做出直接和明确的判断。

② 直接转矩控制磁通估算所用的是定子磁链，只要知道定子电阻就可以将它观测出来。而磁场定向矢量控制所用的是转子磁链。观测转子磁链需要知道电动机转子电阻

和电感。因此直接转矩控制大大减少了矢量控制技术中控制性能易受参数变化影响的问题。

③ 直接转矩控制采用空间矢量的概念来分析三相交流电动机的数学模型并控制其物理量，使问题变得特别简单明了。与矢量控制的方法不同，它不是通过控制电流、磁链等量来间接控制转矩，而是把转矩直接作为被控量，直接控制转矩。因此它并非极力获得理想的正弦波波形，也不专门强调磁链为完全理想的圆形轨迹。相反，从控制转矩的角度出发，它强调的是转矩的直接控制效果，因而它采用离散的电压状态和六边形磁链轨迹或近似圆形磁链轨迹的概念。

④ 直接转矩控制技术对转矩实行直接控制。它的控制效果不取决于电动机的数学模型是否能够简化，而是取决于转矩的实际状况，因此控制既直接又简化。

因此，从理论上看，直接转矩控制有矢量控制所不及的转子参数鲁棒性和结构上的简单性。然而在技术实现上，直接转矩控制往往很难体现优越性，调速范围不及矢量控制宽，其根源主要是其低速转矩特性差、稳态转矩脉动的存在及带负载能力的下降，这些问题制约了直接转矩控制进入实用化的进程。

3.5 永磁同步电动机

永磁同步电动机具有高效、高控制精度、高转矩密度、良好的转矩平稳性及低振动噪声的特点，通过合理设计永磁磁路结构能获得较高的弱磁性能，在电动汽车驱动方面具有很高的应用价值，受到国内外电动汽车界的高度重视，是极具竞争力的电动汽车驱动电动机系统之一。



【永磁同步电动机的工作原理】

3.5.1 永磁同步电动机的结构与特点

1. 永磁同步电动机的结构

永磁同步电动机分为正弦波驱动电流的永磁同步电动机和方波驱动电流的永磁同步电动机。这里介绍的主要是以三相正弦波驱动的永磁同步电动机。

永磁同步电动机的结构示意图如图 3.32 所示。和传统电动机一样，永磁同步电动机主要由定子和转子两大部分构成。

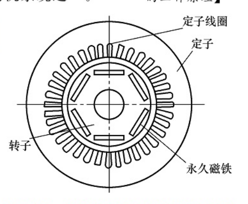


图 3.32 永磁同步电动机的结构示意图

永磁同步电动机的定子与普通感应电动机的定子基本相同，由电枢铁心和电枢绕组构成。电枢铁心一般采用 0.5mm 硅钢冲片叠压而成，对于具有高效率指标或频率较高的电动机，为了减少铁耗，可以考虑使用 0.35mm 的低损耗冷轧无取向硅钢片。电枢绕组则普遍采用分布短距绕组；对于极数较多的电动机，则普遍采用分数槽绕组；需要进一步改善电动势波形时，也可以考虑采用正弦绕组或其他特殊绕组。

转子主要由永磁体、转子铁心和转轴等构成。其中永磁体主要采用铁氧体永磁材料和钕铁硼永磁材料；转子铁心可根据磁极结构的不同，选用实心钢，或采用钢板或硅钢片冲制后叠压而成。

与普通电动机相比，永磁同步电动机还必须装置转子永磁体位置检测器，用来检测磁极位置，并以此对电枢电流进行控制，达到对永磁同步电动机驱动控制的目的。

按照永磁体在转子上位置的不同，永磁同步电动机的转子磁路结构可分为表面式和内置式两种。

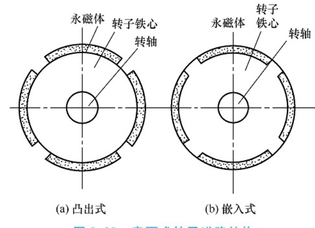


图 3.33　表面式转子磁路结构

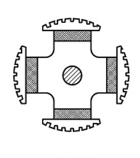
(1) 表面式转子磁路结构。在表面式转子磁路结构中，永磁体通常呈瓦片形，并位于转子铁心的外表面上，永磁体提供磁通的方向为径向。表面式转子磁路结构分为凸出式和嵌入式两种，如图 3.33所示。对采用稀土永磁材料的电动机来说，由于永磁材料的相对回复磁导率接近 1，因此表面凸出式转子在电磁性能上属于隐极转子结构；而表面嵌入式转子的相邻两永磁磁极间有着磁导率很大的铁磁材料，故在电磁性能上属于凸极转子结构。

表面凸出式转子磁路结构具有结构简单、制造成本较低、转动惯量小等优点，在矩形波永磁同步电动机和恒功率运行范围不宽的正弦波永磁同步电动机中得到了广泛应用。此外，表面凸出式转子磁路结构中的永磁磁极易于实现最优设计，使之成为能使电动机气隙磁密波形趋近于正弦波的磁极形状，可显著提高电动机乃至整个传动系统的性能。

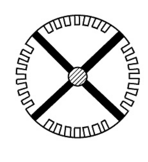
表面嵌入式转子磁路结构可充分利用转子磁路不对称性所产生的磁阻转矩，提高电动机的功率密度，动态性能较凸出式有所改善，制造工艺也较简单，常被某些调速永磁同步电动机所采用，但漏磁系数和制造成本都较凸出式大。

(2) 内置式转子磁路结构。内置式转子磁路结构的永磁体位于转子内部，永磁体外表面与定子铁心内圆之间有铁磁物质制成的极靴，极靴中可以放置铸铝笼或铜条笼，起阻尼或起动作用，动态、稳态性能好，广泛用于要求有异步起动能力或动态性能高的永磁同步电动机。内置式转子内的永磁体受到极靴的保护，其转子磁路结构的不对称所产生的磁阻转矩也有助于提高电动机的过载能力或功率密度，而且易于弱磁扩速。

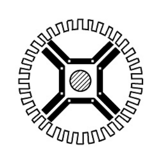
按永磁体磁化方向与转子旋转方向的相互关系，内置式转子磁路结构可分为径向式、切向式和混合式三种，如图 3.34 所示。



(a) 径向式



(b) 切向式



(c) 混合式

图 3.34　内置式转子结构

径向式转子磁路结构的永磁同步电动机的磁钢放在磁通轴的非对称位置上或同时利用径向和切向充磁的磁钢以产生高磁通密度。该结构的优点是漏磁系数小，转轴上不需要采取隔磁措施，极弧系数易控制，转子冲片机械强度高，安装永磁体后转子不易变形等。

切向式转子磁路结构的转子有较大的惯性，漏磁系数较大，制造工艺和成本较径向式有所增加。其优点是一个极距下的磁通由相邻两个磁极并联提供，可得到更大的每极磁通。尤其当电动机极数较多，径向式不能提供足够的每极磁通时，这种结构的优势就显得更突出。此外，采用该结构的永磁同步电动机的磁阻转矩可占到总电磁转矩的40%，对提高电动机的功率密度和扩展恒功率运行范围都是很有利的。

混合式转子磁路结构集中了径向式转子磁路结构和切向式转子磁路结构的优点，但结构和制造工艺都比较复杂，制造成本也比较高。

2. 永磁同步电动机的特点

永磁同步电动机与其他电动机相比，具有以下优点。

(1) 用永磁体取代绕线式同步电动机转子中的励磁绕组，从而省去了励磁线圈、集电环和电刷，以电子换向实现无刷运行，结构简单，运行可靠。

(2) 永磁同步电动机的转速与电源频率间始终保持准确的同步关系，控制电源频率就能控制电动机的转速。

(3) 永磁同步电动机具有较硬的机械特性，对于因负载的变化而引起的电动机转矩的扰动具有较强的承受能力，瞬间最大转矩可以达到额定转矩的3倍以上，适合在负载转矩变化较大的工况下运行。

(4) 永磁同步电动机转子为永久磁铁无需励磁，因此电动机可以在很低的转速下保持同步运行，调速范围宽。

(5) 永磁同步电动机与异步电动机相比，不需要无功励磁电流，因而功率因数高，定子电流和定子铜耗小，效率高。

(6) 体积小、质量轻。近些年来随着高性能永磁材料的不断应用，永磁同步电动机的功率密度得到很大提高，与同容量的异步电动机相比，体积和质量都有较大的减小，使其适合应用在许多特殊场合。

(7) 结构多样化，应用范围广。永磁同步电动机由于转子结构的多样化，产生了特点和性能各异的许多品种，从工业到农业，从民用到国防，从日常生活到航空航天，从简单电动工具到高科技产品，几乎无所不在。

永磁同步电动机存在以下缺点。

(1) 由于永磁同步电动机的转子为永磁体，无法调节，必须通过加定子直轴去磁电流分量来削弱磁场，这会增大定子的电流，增加电动机的铜耗。

(2) 永磁电动机的磁钢价格较高。

由此可见，永磁电动机体积小，质量轻，转动惯量小，功率密度高(可达1kW/kg)，适合电动汽车空间有限的特点需要；另外，转矩惯量比大，过载能力强，尤其低转速时输出转矩大，适合电动汽车的起动加速。因此，永磁电动机得到国内外电动汽车界的广泛重视，并得到了普遍应用。

3.5.2 永磁同步电动机的运行原理与特性

1. 电枢反应

永磁同步电动机带负载时，气隙磁场是永磁体磁动势和电枢磁动势共同建立的。电枢磁动势对气隙磁场有影响，电枢磁动势的基波对气隙磁场的影响称为电枢反应。电枢反应不仅使气隙磁场波形发生畸变，而且会产生去磁或增磁作用，因此，气隙磁场将影响永磁同步电动机的运行特性。

对永磁同步电动机进行分析时，需要采用双反应理论，即需要把电枢电流和电枢电动势分解为交轴和直轴两个分量。交轴电枢电流产生交轴电枢电动势，发生交轴电枢反应；直轴电枢电流产生直轴电枢电动势，发生直轴电枢反应。

2. 电压方程

忽略磁饱和效应的影响，永磁同步电动机的电压方程为

$$U=E_0+I_aR_a+jI_dX_d+jI_qX_q \tag{3-50}$$

式中，U 为电枢端电压；E_0 为励磁电动势；I_a 为电枢电流，$I_a=I_d+I_q$；I_d 为电枢电流在直轴的分量；I_q 为电枢电流在交轴的分量；R_a 为电枢绕组电阻；X_d 为直轴同步电抗；X_q 为交轴同步电抗。

3. 功率与转矩

当永磁同步电动机具有滞后功率因数并考虑电枢电阻的影响时，电动机从电网输入的电功率为

$$\begin{aligned}P_1&=mUI_a\cos\varphi\\&=\frac{mU[E_0(X_q\sin\theta-R_a\cos\theta)+R_aU+U(X_d-X_q)\sin 2\theta/2]}{R_a^2+X_dX_q}\end{aligned} \tag{3-51}$$

式中，θ 为电动机的功率角。

电动机的电磁功率为

$$P_e=P_1-P_{cu\,a} \tag{3-52}$$

式中，$P_{cu\,a}$为电动机的电枢绕组铜耗。

如果忽略电枢电阻的影响，则

$$P_e=\frac{mE_0U}{X_d}\sin\theta+\frac{mU^2}{2}\left(\frac{1}{X_q}-\frac{1}{X_d}\right)\sin 2\theta \tag{3-53}$$

式(3-53)的前半部分称为基本电磁功率，由永磁磁场与电枢磁场相互作用产生；后半部分因凸极效应产生，称为磁阻功率或附加电磁功率。对于永磁同步电动机，充分利用磁阻功率，是提高电动机功率密度和效率的有效途径。

【永磁同步电动机功角特性仿真】

电磁功率与功率角的关系称为永磁同步电动机的功角特性，如图3.35所示。如果把纵坐标改用转矩，则表示了电磁转矩与功率角之间的关系，称为永磁同步电动机的矩角特性。与基本电磁功率相对应的

转矩分量称为基本电磁转矩，也称永磁转矩；与磁阻功率相对应的转矩分量称为磁阻转矩。

4. 运行特性

永磁同步电动机的运行特性主要是机械特性和工作特性。

永磁同步电动机稳态正常运行时，转速始终保持同步速不变，因此，其机械特性为平行于横轴的直线，调节电源频率来调节电动机转速时，转速将严格地与频率成比例变化，如图 3.36 所示。

永磁同步电动机的工作特性是指当电源电压恒定时，电动机的输入功率 P_1、电枢电流 I_a、效率 η、功率因数 $\cos\varphi$ 等随输出功率变化的关系，如图 3.37 所示。

从图 3.37 可以看出，在正常工作范围内，永磁同步电动机的功率因数比较平稳，效率特性也能保持较高的水平，电动机的输入功率和电枢电流近似与输出功率成正比。

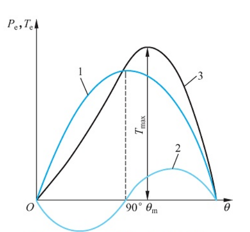


图 3.35 永磁同步电动机的功角特性和矩角特性曲线

1—基本电磁功率、转矩；
2—磁阻功率、转矩；
3—合成电磁功率、转矩

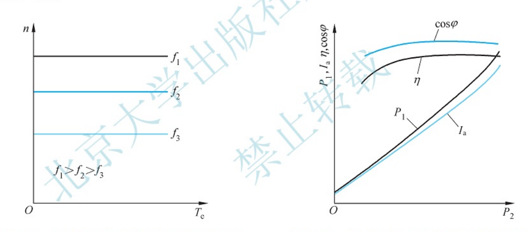


图 3.36 永磁同步电动机的机械特性曲线

图 3.37 永磁同步电动机的工作特性曲线

3.5.3 永磁同步电动机的数学模型

永磁同步电动机的定子是三相对称绕组，按照电动机惯例规定各物理量的正方向。为了便于分析，假定以下条件成立。

(1) 磁路不饱和，电动机电感不受电流变化的影响，不计涡流和磁滞损耗。

(2) 忽略齿槽、换相过程和电枢反应的影响。

(3) 电动机的反电动势是正弦的。

(4) 电动机各相绕组电阻相等，即 $R_A=R_B=R_C=R$。

(5) 转子上无阻尼绕组，永磁体也没有阻尼作用。

三相永磁同步电动机示意图如图 3.38 所示，电动机极对数为 1。图中，定子三相绕组用三个线圈表示；

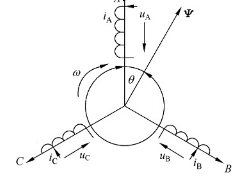


图 3.38 三相永磁同步电动机示意图

Ψ 为转子永磁体磁链的最大值，其方向为转子上安装永磁磁钢的磁场方向；电动机转子以角速度 ω 顺时针方向旋转；θ 为 Ψ 和 A 相绕组间的夹角，$\theta=\omega t+\theta_0$，其中，θ_0 为 $t=0$ 时刻的夹角；u_A、u_B、u_C 分别为三相绕组的相电压瞬时值；i_A、i_B、i_C 分别为三相绕组的相电流瞬时值。

三相绕组的静止坐标系(ABC)电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}+P\begin{bmatrix} L_A & M_{AB} & M_{AC} \\ M_{BA} & L_B & M_{BC} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_C \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}+P\begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} \tag{3-54}$$

式中，L_A、L_B、L_C 分别为三相绕组 A、B、C 的电感；M_{AB}、M_{AC}、M_{BA}、M_{BC}、M_{CB}、M_{CA}分别为三相绕组之间的互感；Ψ_A、Ψ_B、Ψ_C 分别为永磁体磁链在各相绕组中的投影；$P=\mathrm{d}/\mathrm{d}t$ 为微分算子。

永磁同步电动机在三相静止坐标系下的电压方程为一组变系数的线性微分方程，不易直接求解。常用更简单的、等效的原型电动机来替代实际电动机，并使用坐标变化方法，以方便分析和求解。

通过坐标变换，可以将永磁同步电动机在三相静止坐标系下的电压电流量变换到转子坐标系下，由此可得

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-2\pi/3) & \cos(\theta-4\pi/3) \\ \sin\theta & \sin(\theta-2\pi/3) & \sin(\theta-4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \tag{3-55}$$

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1/\sqrt{2} \\ \sin(\theta-2\pi/3) & \sin(\theta-2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta-4\pi/3) & \sin(\theta-4\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} \tag{3-56}$$

电磁转矩方程为

$$T_e=p_n(\Psi_d i_q-\Psi_q i_d)=p_n[\Psi_f i_q+(L_d-L_q)i_d i_q] \tag{3-57}$$

式中，p_n 为电动机磁极对数；Ψ_d、Ψ_q 为直、交轴磁链；Ψ_f 为永磁体产生的磁链；L_d、L_q 为直、交轴电感；i_d、i_q 为直、交轴电流。

定子电流空间矢量 i_s 与定子磁链空间矢量 Ψ_s 同相，并且定子磁链与永磁体产生的气隙磁场间的空间角度为 β，则

$$\begin{aligned} i_d &= i_s\cos\beta \\ i_q &= i_s\sin\beta \end{aligned} \tag{3-58}$$

将式(3-58)代入式(3-57)，得

$$T_e=p_n\Psi_f i_s\sin\beta+\frac{1}{2}p_n(L_d-L_q)i_s^2\sin2\beta \tag{3-59}$$

由式(3-59)可以看出，永磁同步电动机输出转矩包含两个分量：一个是由两磁场互相作用所产生的电磁转矩；另一个是由凸极效应引起，并与两轴电感参数的差值成正比的磁阻转矩。

3.5.4 永磁同步电动机的控制

为了提高永磁同步电动机控制系统的性能，使其具有更快的响应速度和更高的转速精度及更宽的调速范围，其动态、静态响应能够与直流电动机系统相媲美，提出了各种新型控制策略用于永磁同步电动机控制。

1. 恒压频比开环控制

恒压频比开环控制的控制变量为电动机的外部变量，即电压和频率。控制系统将参考电压和频率输入实现控制策略的调制器中，由逆变器产生交变的正弦电压施加在电动机的定子绕组上，使之运行在指定的电压和参考频率下。按照这种控制策略进行控制，使供电电压的基波幅值随着速度指令成比例地线性增长，从而保持定子磁通的近似恒定。恒压频比开环控制的控制策略简单，易于实现，转速通过电源频率进行控制，不存在异步电动机的转差和转差补偿问题。但同时，由于系统中不引入速度、位置等反馈信号，因此无法实时捕捉电动机状态，致使无法精确地控制电磁转矩；在突加负载或者速度指令时，容易发生失步现象；也没有快速的动态响应特性。因此，恒压频比开环控制只是控制电动机磁通而没有控制电动机的转矩，控制性能差，通常只用在对调速性能要求一般的通用变频器上。

2. 矢量控制

矢量控制理论的基本思想为，以转子磁链旋转空间矢量为参考坐标，将定子电流分解为相互正交的两个分量，一个与磁链同方向，代表定子电流励磁分量，另一个与磁链方向正交，代表定子电流转矩分量，分别对其进行控制，获得与直流电动机一样良好的动态特性。因其控制结构简单，控制软件实现较容易，已被广泛应用到调速系统中。

永磁同步电动机矢量控制策略与异步电动机矢量控制策略有些不同。由于永磁同步电动机转速和电源频率严格同步，其转子转速等于旋转磁场转速，转差恒等于零，没有转差功率，控制效果受转子参数影响小，因此在永磁同步电动机上更容易实现矢量控制。

由于永磁同步电动机输出电磁转矩对应多个不同的交、直轴电流组合，不同组合对应着不同的系统效率、功率因素及转矩输出能力，因此永磁同步电动机有不同的电流控制策略。

(1) $i_d=0$ 控制，也称磁场定向控制。在永磁同步电动机伺服系统中，电流控制主要采用 $i_d=0$ 控制。通过检测转子磁极空间位置 d 轴，控制逆变器功率开关器件的导通与关断，使定子合成电流为位于 q 轴，此时 d 轴的定子电流分量为零，永磁同步电动机电磁转矩正比于转矩电流，即正比于定子电流幅值，只需控制定子电流大小就可以很好地控制永磁同步电动机的输出电磁转矩。

(2) 最大转矩/电流比控制。在电动机输出相同电磁转矩下使电动机定子电流最小的控制策略称为最大转矩/电流比控制。

最大转矩/电流比控制的实质是求电流极值问题，可以通过建立辅助方程，采用牛顿迭代法求解。但是，求解计算量较大，在实际应用中系统实时性无法满足，只有通过离线计算出不同电磁转矩对应的交、直轴电流，以表的形式存放于 DSP 控制器中，实际运行时根据负载情况查表求得对应的 i_d、i_q 进行控制。

(3) 弱磁控制。永磁同步电动机弱磁控制思想来自他励直流电动机调磁控制。对于他



励直流电动机，当其电枢端电压达到最高电压时，为使电动机能运行于更高转速，采取降低电动机励磁电流的方法，以平衡电压。在永磁同步电动机电压达到逆变器所能输出的电压极限后，要想继续提高转速，也要采取弱磁增速的方法。

永磁同步电动机励磁磁动势由永磁体产生，无法像他励直流电动机那样通过调节励磁电流实现弱磁。传统方法是通过调节定子电流 i_d 和 i_q，增加定子直轴去磁电流分量实现弱磁增速。为保证电动机电枢电流幅值不超过极限值，转矩电流分量 i_q 应随之减小，因此这种弱磁控制过程本质上就是在保持电动机端电压不变情况下减小输出转矩的过程，永磁同步电动机直轴电枢反应比较微弱，因此需要较大的去磁电流才能起到弱磁增速的作用。在电动机工作在额定电流情况下，去磁电流的增加有限，因此采用这种方法所能得到的弱磁增速范围也是有限的。

图 3.39 是某电动汽车用永磁同步电动机矢量控制系统框图。从图 3.39 可知，此系统通过分别比较控制永磁同步电动机的电流实际值 i_d、i_q 与给定值 i_d^*、i_q^*，实现转速和转矩控制。并且，i_d 和 i_q 独立控制，便于实现各种先进的控制策略。

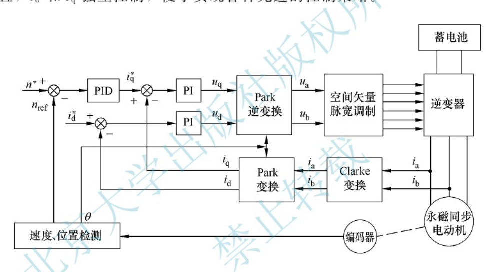


图 3.39 电动汽车用永磁同步电动机矢量控制系统框图

当电动汽车正常行驶时，电动机转速处于基速以下运行，在定子电流给定的情况下，$i_d=0$ 的电磁转矩 $T_e=p_n\Psi_f i_q$，这样只要控制 i_q 的大小就能控制转速和转矩，实现矢量控制；当电动机转速在基速以上时，由于永磁体的励磁磁链为常数，电动机的感应电动势随着电动机转速成比例地增加，电动机的感应电压也跟随提高，但是电动机的相电压和相电流的有效值的极限值受到与电动机端相连的逆变器的直流侧电压和逆变器的最大输出电流的限制，所以必须进行弱磁增速。通过控制 i_d 来控制磁链，通过控制 i_q 来控制转速，实现矢量控制。在实际控制中，i_d、i_q 不能直接被检测，所以必须通过实时检测到的三相电流和电动机转子位置经坐标变换得到。

矢量控制本身也存在一定的缺陷，具体如下。

(1) 转子磁链的准确观测存在一定的难度，转子磁链的计算对电动机的参数有较强的依赖性，因此对参数变化较敏感。为了克服这一问题，出现了多种参数辨识方法，但这些方法进一步增加了系统的复杂性。

(2) 由于需要进行解耦运算，采用了矢量旋转变换，系统计算比较复杂。

但是，永磁同步电动机矢量控制系统能实现高精度、高动态响应性能和大范围的调速

或伺服控制。随着工业领域对高性能伺服系统需求的不断增加，尤其是数控、机器人等方面技术的发展，永磁同步电动机矢量控制作为一种相对比较成熟的控制策略具有广阔的应用前景。

3. 直接转矩控制

永磁同步电动机直接转矩控制系统框图如图3.40所示。实际系统中，开关信号是由转矩和定子磁链的给定值与反馈值的偏差经滞环比较得到的。而转矩和定子磁链的给定值是由电磁转矩和定子磁链估算模型计算得到的。

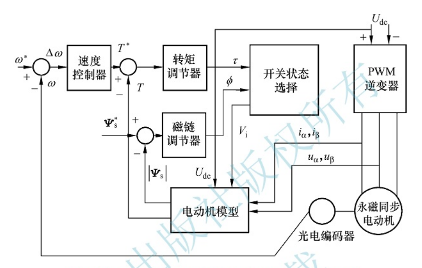


图3.40 永磁同步电动机直接转矩控制系统框图

直接转矩控制系统的控制过程：对于逆变器输出的三相电流 i_A、i_B、i_C 通过3/2变换得到 i_α、i_β；由逆变器的电压状态与逆变器的开关状态直流电压 U_{dc} 之间的关系，可以得到 u_α、u_β。由磁链模型得到磁链在 $\alpha\beta$ 坐标系上的分量 Ψ_α、Ψ_β，再由 Ψ_α、Ψ_β、i_α、i_β 通过转矩模型，得到转矩 T，与PI速度调节器输出转矩给定 T^* 进行滞环比较，输出结果用来决定开关状态。对 Ψ_α、Ψ_β 求平方和，得到的 $|\Psi_s|$ 与磁链给定 Ψ_s^* 进行比较，由滞环比较器输出结果。同时利用 Ψ_α、Ψ_β 判断磁链所在区域，确定 θ 值，综合调节器的输出及 θ 值，合理选择开关矢量以确定逆变器的开关状态。

直接转矩控制不需要传统矢量控制中复杂的旋转坐标变换和转子磁链定向，转矩取代电流成为受控对象，电压矢量则是控制系统唯一的输入，直接控制转矩和磁链的增加或减小，但是转矩和磁链并不解耦，对电动机模型进行简化处理，没有PWM信号发生器，控制结构简单，受电动机参数变化影响小，能够获得极佳的动态性能。

4. 智能控制

为了提高永磁同步电动机的控制性能和控制精度，模糊控制、神经网络控制等开始应用于同步电动机的控制。

采用智能控制的永磁同步电动机控制系统，在多环控制结构中，智能控制器处于最外环充当速度控制器，而内环电流控制、转矩控制仍采用PI控制、直接转矩控制。这主要是因为外环是决定系统的根本因素，而内环的主要作用是改造对象特性以利于外环的控制。各种扰动给内环带来的误差可以由外环控制或抑制。

在永磁同步电动机系统中应用智能控制时，也不能完全摒弃传统的控制方法，必须将两者很好地结合起来，才能彼此取长补短，使系统的性能达到最优。

3.5.5 永磁同步电动机控制系统仿真

以磁场定向控制和弱磁控制为例，进行永磁同步电动机控制系统的仿真。

1. 永磁同步电动机控制系统仿真模型的建立

永磁同步电动机磁场定向控制原理如图 3.41 所示。

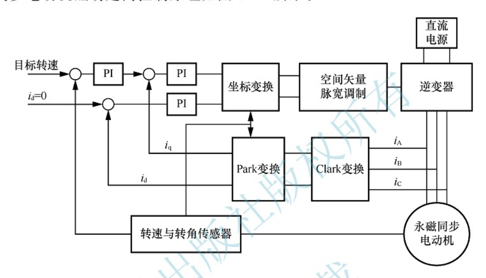


图 3.41 永磁同步电动机磁场定向控制原理

永磁同步电动机磁场定向控制系统仿真模型如图 3.42 所示。

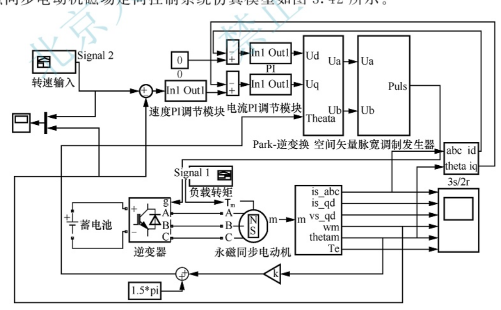


图 3.42 永磁同步电动机磁场定向控制系统仿真模型

永磁同步电动机弱磁控制原理如图 3.43 所示。

永磁同步电动机弱磁控制系统仿真模型如图 3.44 所示。

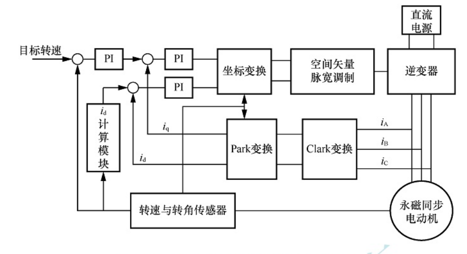


图 3.43 永磁同步电动机弱磁控制原理

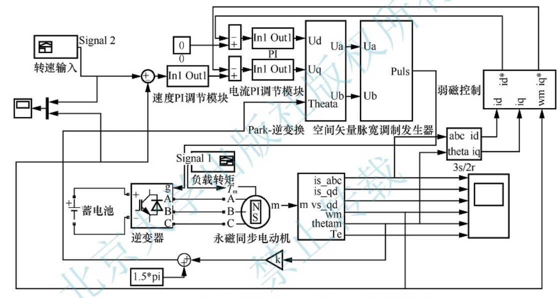


图 3.44 永磁同步电动机弱磁控制系统仿真模型

两种控制模型主要模块相同，不同的是弱磁控制模型加入了直轴电流的计算模块。其中，永磁同步电动机与逆变器模块采用了SimPowerSystem库中的永磁同步电动机与逆变器模型。永磁同步电动机模型包括三相电流和负载转矩的输入端口，电动机本身的电阻、电感等参数都可以根据实际电动机参数进行修改，电动机转速、转矩、三相电流和转子角度都可以通过电动机测量模块得到。

坐标变换模块通过Park逆变换，将由速度PI调节模块得到的给定直轴与交轴电流转化为空间脉宽调制所需的空间参考电压矢量，如图3.45所示。

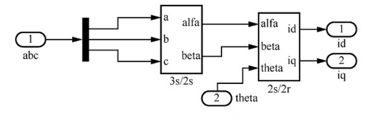


图 3.45 坐标变换模块

空间矢量脉宽调制仿真模块是空间脉宽调制的主要实现模块，根据给定的空间参考电压矢量生成所需的逆变器脉宽调制驱动信号，控制逆变器产生的三相电流，从而实现对电动机的控制。空间矢量脉宽调制仿真模块主要包括扇区判断模块、电压矢量切换点计算(包括作用时间计算和切换时间计算)模块、脉宽调制模块等，如图 3.46 所示。

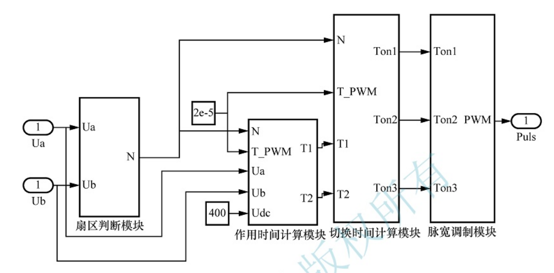


图 3.46　空间矢量脉宽调制仿真模块

2. 永磁同步电动机性能仿真

在实际设计电动汽车驱动电动机时，常用实验测得的电动机的效率 Map 图来对电动机的区域性能进行评价，然后对电动机参数进行修改，这样会使设计效率大大降低。为了提高设计效率、节约设计成本，在设计之初就应该引入电动机控制策略对电动机的工作性能进行计算，得到电动机的效率 Map 图。

永磁同步电动机的主要参数：电枢绕组相电阻为 0.021Ω，磁链为 0.1688H，直轴电感为 0.00126H，交轴电感为 0.00056H，电动机极对数为 4，转动惯量为 $0.043\text{kg}\cdot\text{m}^2$，电动机摩擦系数为 0.00048Nm·s。

为了模拟汽车在负载下起动的过程，设定永磁同步电动机在 50N·m 恒定不变的负载转矩下，由静止起动加速度到 3000r/min，电动机的转速波形如图 3.47 所示，汽车由静止开始平稳加速，约在 0.06s 时电动机转速达到 3000r/min，其后保持稳定。

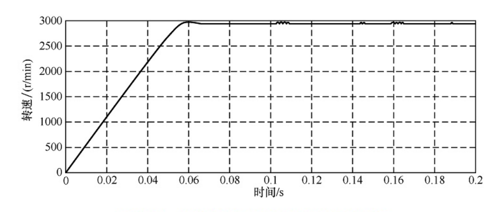


图 3.47　负载起动工况下电动机的转速波形

负载起动工况下电动机的转矩波形和三相电流波形分别如图 3.48 和图 3.49 所示。加

速过程中，电动机的平均转矩约为120N·m，相应的三相电流幅值在100A左右，转矩波动较大。0.06s后，随着电动机转速达到预期转速，电动机转矩也稳定在50N·m左右，三相电流最大幅值在45A左右，此时电动机转矩波动较小。

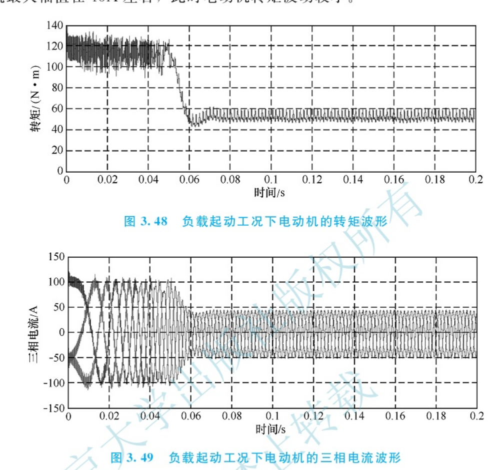


图 3.48　负载起动工况下电动机的转矩波形

图 3.49　负载起动工况下电动机的三相电流波形

为模拟电动汽车加速的过程，在电动机转速由1000r/min增加到2500r/min时，负载转矩逐渐由50N·m增加到80N·m，持续运行一段时间后永磁同步电动机转矩由80N·m突然增加到120N·m，模拟了电动汽车爬坡的过程。

电动机在汽车加速爬坡的整个过程中，电动机的转速波形如图3.50所示。电动机初始转速为1000r/min，在0.1s开始平稳加速，0.3s时达到2500r/min并保持不变，0.4s时由于负载转矩增加，电动机转速逐步下降。

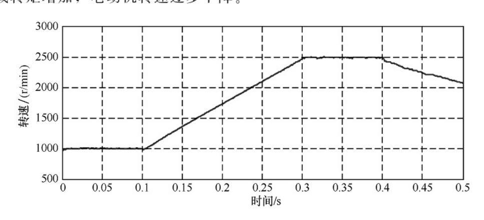


图 3.50　加速爬坡工况下电动机的转速波形

加速爬坡工况下电动机的转矩和三相电流波形分别如图 3.51 和图 3.52 所示。0.1s 时，随着电动机加速，电动机提供的转矩逐步增大，相应的三相电流也逐步增加。由于转速增加，三相电流的频率也逐步升高。0.4s 后，负载转矩突然从 80N·m 左右增加到 120N·m 左右，相应的三相电流的幅值也由 70A 左右增加到 110A 左右。

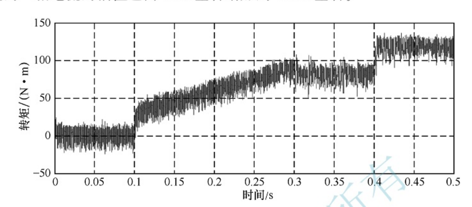


图 3.51 加速爬坡工况下电动机的转矩波形

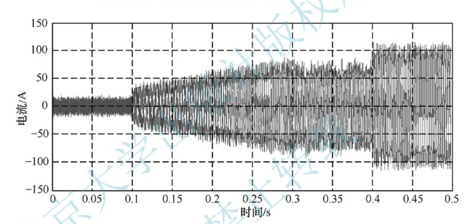


图 3.52 加速爬坡工况下电动机的三相电流波形

可以看出，控制系统响应较快，在 50N·m 的负载转矩下可以平稳起动，加速和爬坡过程中转矩、转速都较平稳，没有出现明显振荡。速度增加时，三相电流频率变快；负载转矩变大时，电流幅值变大，变化趋势均与实际相符。

通过对电动机不同转速、转矩下工作状态的仿真，可以方便地计算出不同转速、转矩下对应的电动机输入功率与输出功率，从而计算得到相应的电动机效率。通过这种方法，在电动机设计进入实验验证前期便可以引入不同的控制策略，并且计算绘制相应控制策略下的电动机效率 Map 图。将得到的结果引入整车性能仿真软件中评价电动机在整个运行区域内的工作性能，并以此优化相关的电动机性能参数，尽可能使电动机工作在高效区。

磁场定向控制下的电动机效率 Map 图如图 3.53 所示。



【电动机效率MAP图绘制】

弱磁控制下的电动机效率 Map 图如图 3.54 所示。

对比两图不难看出，加入弱磁控制后，电动机可运行的最高转速提高到了 7000r/min，而且部分工况下电动机的效率也有所提高。可见，合理的控制策略对改善电动机的运行性能有很大的帮助。加入弱磁控制后，电动机在 1000～4000r/min 时的效率基本都在 90%以上，并且最高效率达到 95%以上，电动机的转矩和最高转速也都能满足使用要求。

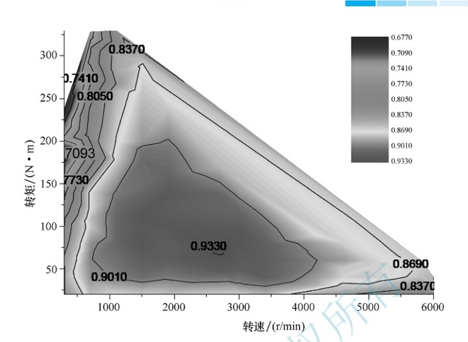


图 3.53 磁场定向控制下的电动机效率 Map 图

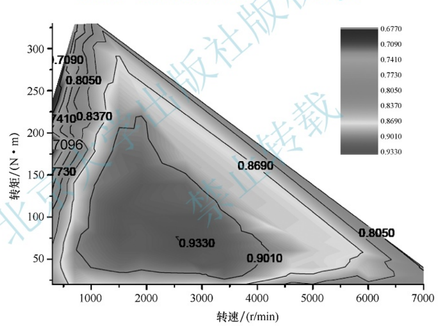


图 3.54 弱磁控制下的电动机效率 Map 图

3.6 开关磁阻电动机

开关磁阻电动机是继直流电动机和交流电动机之后，又一种极具发展潜力的新型电动机。

3.6.1 开关磁阻电动机的结构与特点

1. 开关磁阻电动机的结构

开关磁阻电动机由双凸极的定子和转子组成。定子由硅钢片叠成，其上绕有集中绕

组，把沿径向相对的两个绕组串联成一个两级磁极，称为“一相”；转子既无绕组又无永磁体，仅由硅钢片叠成。

开关磁阻电动机有多种不同的相数结构，如单相、二相、四相及多相等，而且定子和转子的极数有多种不同的搭配。开关磁阻电动机的极数组合见表 3－3。

表 3－3　开关磁阻电动机的极数组合

相　　数	3	4	5	6	7	8	9
定子极数	6	8	10	12	14	16	18
转子极数	4	6	8	10	12	14	16
步进角/(°)	30	15	9	9	4.25	3.21	2.5

低于三相的开关磁阻电动机一般没有自起动能力。电动机相数多，有利于减小转矩脉动，但导致结构复杂、主开关器件多、成本增加。目前应用较多的是四相 8/6 极结构和三相 6/4 极结构。下面介绍的开关磁阻电动机的结构为四相 8/6 极结构。

2. 开关磁阻电动机的特点

开关磁阻电动机与其他电动机相比，具有以下优点。

(1) 可控参数多，调速性能好。开关磁阻电动机的可控参数有主开关开通角、主开关关断角、相电流幅值、直流电源电压。电动机控制方便，可四象限运行，容易实现正转、反转和电动、制动等特定的调节控制。

(2) 结构简单，成本低。开关磁阻电动机转子无绕组，也不加永久磁铁，定子为集中绕组，比传统的直流电动机、永磁电动机及感应电动机都简单，制造和维护方便；它的功率变换器比较简单，主开关元件数较少，电子器件少，成本低。

(3) 损耗小，运转效率高。开关磁阻电动机的转子不存在励磁及转差损耗，功率变换器元器件少，相应的损耗也小；控制灵活，易于在很宽转速范围内实现高效节能控制。

(4) 起动转矩大，起动电流小。在 15%额定电流的情况下就能达到 100%的起动转矩。

由于开关磁阻电动机的特殊结构和工作方式，其存在如下缺点。

(1) 转矩脉动现象较大。

(2) 振动和噪声相对较大，特别是在负载运行时。

(3) 电动机的出线头相对较多，还有位置检测器出线端。

(4) 电动机的数学模型比较复杂，建立准确的数学模型较难。

(5) 控制复杂，而且依赖于电动机的结构。

3.6.2　开关磁阻电动机的工作原理与运行特性



【开关磁阻电动机的工作原理】

1. 开关磁阻电动机的工作原理

开关磁阻电动机的工作原理如图 3.55 所示。图中，S_1、S_2 是电子开关；VD_1、VD_2 是二极管，U 是直流电源。

电动机的定子和转子呈凸极形状，极数互不相等。转子由叠片构成，带位置检测器，以提供转子位置信号。定子绕组按一定的顺序通

断，可保持电动机的连续运行。

开关磁阻电动机的磁阻随着转子磁极与定子磁极对准或错开而变化。因为电感与磁阻成反比，所以当转子磁极与定子磁极完全错开位置时，相绕组电感最大；当转子磁极与定子磁极完全正对时，相绕组电感最小。

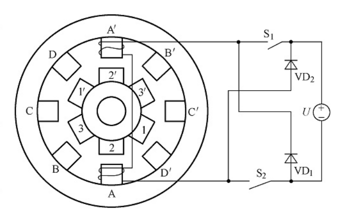


图 3.55　开关磁阻电动机的工作原理

因为开关磁阻电动机的运行原理遵循“磁阻最小原理”——磁通总要沿着磁阻最小的路径闭合，所以具有一定形状的铁心在移动到最小磁阻位置时，必须使自己的主轴线与磁场的轴线重合。由图 3.55 可看出，当定子 D－D′极励磁时，所产生的磁力力图使转子旋转到转子极轴线 1－1′与定子极轴线 D－D′重合的位置，并使 D 相励磁绕组的电感最大。若以图中定子、转子所处的相对位置作为起始位置，则依次给 D—A—B—C 通电，转子即会逆着励磁顺序以逆时针方向连续旋转；反之，若依次给 B—A—D—C 通电，则电动机会沿着顺时针方向转动。所以开关磁阻电动机的转向与相绕组的电流方向无关，仅取决于相绕组的通电顺序。

2. 开关磁阻电动机的运行特性

开关磁阻电动机的运行特性可分为三个区域：恒转矩区、恒功率区、自然特性区(串励特性区)，如图 3.56 所示。

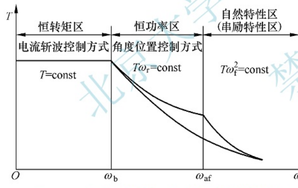


图 3.56　开关磁阻电动机的运行特性曲线

开关磁阻电动机一般运行在恒转矩区和恒功率区。在这两个区域，电动机的实际运行特性可控。通过控制条件，可以实现在实线以下的任意实际运行特性。

在恒转矩区，电动机转速较低，电动机反电动势小，因此需采用电流斩波控制(Chopped Current Control，CCC)方式。

在恒功率区，旋转电动势较大，开关器件导通的时间较短，因此电流较小。在外加电压和开关角一定的条件下，随着角速度的增加，转矩急剧下降，此时可采用角度位置控制(Angle Position Control，APC)方式，通过按比例地增大导通角来补偿，延缓转矩的下降速度。

在自然特性区，电动机的可控条件已达极限，运行特性不再可控，呈现自然串励运行特性。因此电动机一般不运行在此区域。

电动机运行时存在第一、第二两个临界运行点，采用不同的可控条件匹配可得到两个临界点的不同配置，从而得到所需的各种机械特性。

临界运行点对应的转速称为临界转速。它是开关磁阻电动机运行和设计时要考虑的重要参数。第一临界转速是开关磁阻电动机开始运行于恒功率区的临界转速，定义为开关磁阻电动机的额定转速，对应的功率即为额定功率；第二临界转速是能得到额定功率的最高

转速，是恒功率特性的上限，可控条件都达到了极限，当转速再增加时，输出功率将下降。

3.6.3 开关磁阻电动机的数学模型

开关磁阻电动机数学模型通常有线性模型、准线性模型(分段线性模型)和非线性模型等。

1. 开关磁阻电动机的线性模型

线性模型比较简单，忽略了电磁饱和、涡流、磁滞、边缘效应、相间的互感等非线性因素影响。由于不考虑非线性因素，绕组的电感只与定子和转子的相对位置有关，与相电流的大小无关。这样，就能较容易地得出磁链和转矩的简易解析式，分析开通角和关断角等参数对电动机运行特性的影响规律，从而找到最佳的控制策略，使电动机满足运行要求。但这种线性模型与开关磁阻电动机的实际特性存在很大的出入，故电动机参数的计算求解的精度比较低，运用在实际中误差就会较大，因此，只适于作为分析电动机工作特性和参数间相互关系的理论依据。

(1) **基本方程**

当恒定直流电源给开关磁阻电动机供电时，其电压方程为

$$U_s = Ri + \frac{d\Psi}{dt} \tag{3-60}$$

式中，U_s 为电源电压；R 为绕组电阻；i 为绕组电流；Ψ 为绕组磁链。

绕组磁链与绕组电流和转子位置有关，即

$$\Psi = \Psi(i,\ \theta) = L(\theta)i \tag{3-61}$$

式中，θ 为转子位置角；L 为定子绕组电感。

由式(3-60)和式(3-61)可得

$$U_s = Ri + L(\theta)\frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta)}{d\theta}\frac{d\theta}{dt} \tag{3-62}$$

式(3-62)中，第一项为电阻压降，第二项为变压器电动势，第三项为旋转电动势。电阻压降与旋转电动势相比很小，可忽略不计，故可将式(3-60)简化为

$$\pm U_s = \frac{d\Psi}{dt} = L\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{d\theta}\omega \tag{3-63}$$

式中，ω 为电动机的角速度；“+”对应绕组通电阶段，“−”对应续流阶段。

在绕组通电期间，功率方程为

$$W_s = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}Li^2\right) + i^2\frac{dL}{d\theta}\omega \tag{3-64}$$

式(3-64)表明，当开关磁阻电动机绕组通电时，若不计绕组损耗，输入的电能一部分储存在绕组中，另一部分则转换为机械功率输出。

根据力学原理，电动机的转矩表达式为

$$T_e = J\frac{d\omega}{dt} + K_T\omega + T_L = J\frac{d^2\theta}{dt^2} + K_T\frac{d\theta}{dt} + T_L \tag{3-65}$$

式中，T_e 为电磁转矩；J 为电动机转动惯量；K_T 为阻尼因数；T_L 为负载转矩。

电动机的电磁转矩也可以通过磁共能和转子位置求得，即

$$T_e=\frac{\partial W(i,\theta)}{\partial \theta} \tag{3-66}$$

式中，W 为磁共能。

（2）绕组电感

图 3.57 所示为线性模型中定子绕组电感与转子位置角的关系曲线。图中，横坐标为转子位置角 θ，纵坐标为定子绕组电感 L；原点对应于定子凸极中心线与转子极间中心线重合的位置；θ_1为转子凸极后沿与定子凸极前沿重合处；θ_2为转子凸极前沿与定子凸极后沿重合处；θ_3为转子凸极前沿与定子凸极前沿重合处；θ_4为转子凸极后沿与定子凸极后沿重合处；θ_5与 θ_1重合。

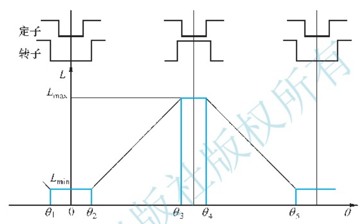


图3.57　线性模型中定子绕组电感与转子位置角的关系曲线

在 $\theta_1\sim\theta_2$ 区域内，定子凸极与转子槽相对，此时磁阻恒为最大，电感保持最小值 L_{min}不变。

在 $\theta_2\sim\theta_3$ 区域内，转子转过 θ_2 后，电感便开始线性上升，直到 θ_3 为止，这时定子凸极、转子凸极全部重合，磁阻恒为最小，电感变为最大值 L_{max}。

在 $\theta_3\sim\theta_4$ 区域内，由于转子极弧 β_r 通常要求大于定子极弧 β_s，因此，定子、转子凸极保持全部重叠，相应的定子、转子凸极间磁阻恒为最小值，电感保持在最大值 L_{max}。

在 $\theta_4\sim\theta_5$ 区域内，转子转过 θ_4 后，电感开始线性下降，直到 θ_5 处降为 L_{min}。

由图 3.57 可得开关磁阻电动机任意相绕组电感方程为

$$L(\theta)=\begin{cases}L_{min} & \theta_1\leqslant\theta\leqslant\theta_2\\ L_{min}+K(\theta_1-\theta_2) & \theta_2<\theta\leqslant\theta_3\\ L_{max} & \theta_3<\theta\leqslant\theta_4\\ L_{max}-K(\theta-\theta_4) & \theta_4<\theta\leqslant\theta_5\end{cases} \tag{3-67}$$

式中，$K=(L_{max}-L_{min})/(\theta_3-\theta_2)=(L_{max}-L_{min})/\beta_s$，$\beta_s$ 称为定子磁极极弧。

（3）电磁转矩

当电流为一恒定值时，电磁转矩为

$$T_e=\left.\frac{\partial W'(i,\theta)}{\partial \theta}\right|_{i=\text{const}}=\frac{1}{2}i^2\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\theta} \tag{3-68}$$

由式(3-67)和式(3-68)得电磁转矩为

$$T_e=\begin{cases}0 & \theta_1\leqslant\theta\leqslant\theta_2\\ Ki^2/2 & \theta_2<\theta\leqslant\theta_3\\ 0 & \theta_3<\theta\leqslant\theta_4\\ -Ki^2/2 & \theta_4<\theta\leqslant\theta_5\end{cases} \tag{3-69}$$

由式(3-69)可知，若在电感上升区域 $\theta_2 \sim \theta_3$ 内给绕组通电，则产生电磁转矩；若在 $\theta_1 \sim \theta_2$ 和 $\theta_3 \sim \theta_4$ 区域内给绕组通电，则电磁转矩为零。若电流在电感下降区域 $\theta_4 \sim \theta_5$ 内流动，则电磁转矩为负值，产生制动转矩。

总结开关磁阻电动机的线性转矩模型，可得以下结论。

① 电磁转矩是由于转子转动时气隙磁导变化产生的，电感对位置角的变化率越大，电动机转矩越大，因此电动机转子极数小于定子极数，有利于增大电感相对转子位置的变化率。

② 电磁转矩大小与电流二次方成正比，可通过增大电流有效地增加转矩。

③ 电磁转矩的方向与导通时定子、转子的相对位置有关，因此，可通过改变绕组通电时刻改变电动机转向，而改变电流方向不会改变转矩的方向。

④ 由于在电感下降阶段，电磁转矩为制动性质的转矩，因此主开关器件的关断不能太迟，应根据控制策略选择一个合适的值。

(4) **绕组电流**

式(3-63)可改写为

$$\frac{\pm U_s}{\omega} = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}\theta} + i\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}t} \tag{3-70}$$

设开通角为 θ_{on}，关断角为 θ_{off}，若已知初始条件 $i_0 = 0$，$\theta_0 = \theta_{on}$，则根据式(3-69)和式(3-70)可得绕组电流，即

$$i(\theta) = \begin{cases} \dfrac{U}{L_{\min}} \dfrac{\theta - \theta_{on}}{\omega} & \theta_1 \leqslant \theta < \theta_2 \\ \dfrac{U(\theta - \theta_{on})}{\omega[L_{\min} + K(\theta - \theta_2)]} & \theta_2 \leqslant \theta \leqslant \theta_{off} \\ \dfrac{U(2\theta_{off} - \theta_{on} - \theta)}{\omega[L_{\min} + K(\theta - \theta_2)]} & \theta_{off} < \theta < \theta_3 \\ \dfrac{U(2\theta_{off} - \theta_{on} - \theta)}{\omega L_{\max}} & \theta_3 \leqslant \theta < \theta_4 \end{cases} \tag{3-71}$$

由式(3-71)可知，在 $\theta_1 \leqslant \theta < \theta_2$ 区域，$\mathrm{d}i/\mathrm{d}\theta = U_s/(\omega L_{\min})$，当 ω 在一定小范围变化时，可认为 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}\theta = \mathrm{const}$，即电流线性上升。这是由于在此区域绕组电感最小，对绕组电流限制能力小。若减小 θ_{on}，则绕组电流的幅值将相应地增加，因此，为了使电动机在电感上升区有足够的电流来产生转矩，可适当减小 θ_{on}。

在 $\theta_2 \leqslant \theta \leqslant \theta_{off}$ 区域，根据电流方程，可知

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}\theta} = \frac{U[L_{\min} + K(\theta_{on} - \theta_2)]}{\omega[L_{\min} + K(\theta - \theta_2)^2]} \tag{3-72}$$

根据 θ_{on} 取值的不同，式(3-72)又可分为以下三种情况。

① 若 $\theta_{on} < \theta_2 - L_{\min}/K$，则 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}\theta < 0$，即绕组电流在进入电感上升区时开始下降。这是因为 θ_{on} 过小，绕组电流在 θ_2 时将有较大的数值，造成旋转电动势引起的压降超过了电源电压 U_s。

② 若 $\theta_{on} = \theta_2 - L_{\min}/K$，则 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}\theta = 0$，即绕组电流在进入电感上升区时保持不变。

③ 若 $\theta_{on} > \theta_2 - L_{\min}/K$，则 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}\theta > 0$，即绕组电流在进入电感上升区时继续上升。

在 $\theta_{off} < \theta < \theta_3$ 区域，绕组电流处于续流过程。为使电流在到达 θ_3 时降为0，可将初始条件 $i(\theta_3) = 0$ 代入式(3-71)，即

$$\theta_{off}=(\theta_{on}+\theta_3)/2 \tag{3-73}$$

随着θ_{off}取值的不同，绕组电流波形也将不同。若要使电动机不产生制动转矩，必须保证续流电流在电感达到最大值之前降为零，则θ_{off}的取值应满足

$$\theta_{off}<(\theta_{on}+\theta_3)/2 \tag{3-74}$$

2. 开关磁阻电动机的准线性模型

准线性模型采用分段线性化的方法描述电动机的电磁特性曲线。它的数学表达式也相对简单。因为在磁链的饱和区和非饱和区有不同的线性变化率，为了近似地考虑磁路的饱和效应、边缘效应，可将实际的非线性磁化特性曲线进行分段线性化处理，同时不考虑相间的耦合效应，这样就可以用解析式来表示每段的磁化特性曲线，一般可将磁化特性曲线分为两段（线性区与饱和区）或三段（线性区、低饱和区与高饱和区）。

为了便于实现，采用一般常见的两段线性化分法，将磁化特性曲线分为非饱和段与饱和段。非饱和段的曲线斜率为电感$L(i, \theta)$的不饱和值；饱和段曲线可视为与$\theta=0$位置的非饱和特性曲线平行，其斜率为L_{min}，如图3.58所示。

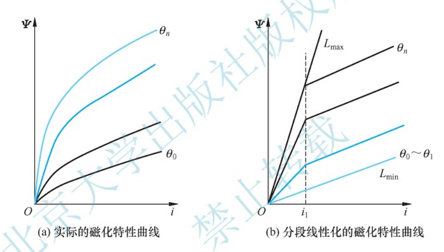


图3.58 磁化特性曲线

根据磁化特性曲线分段线性化的规则，结合电感线性化特性曲线$L(\theta)$，可以得出电感$L(i, \theta)$的分段解析表达式为

$$L(i,\theta)=\begin{cases} L_{min} & (\theta_1\leqslant\theta\leqslant\theta_2) \\ \left.\begin{array}{ll} L_{min}+K(\theta-\theta_2) & 0\leqslant i\leqslant i_1 \\ L_{min}+K(\theta-\theta_2)\dfrac{i_1}{i} & i\geqslant i_1 \end{array}\right\} & (\theta_2<\theta\leqslant\theta_3) \\ \left.\begin{array}{ll} L_{max} & 0\leqslant i\leqslant i_1 \\ L_{min}+\dfrac{i_1(L_{max}-L_{min})}{i} & i\geqslant i_1 \end{array}\right\} & (\theta_3<\theta\leqslant\theta_4) \\ \left.\begin{array}{ll} L_{max}-K(\theta-\theta_4) & 0\leqslant i\leqslant i_1 \\ L_{min}+\dfrac{L_{max}-L_{min}-K(\theta-\theta_4)}{i}i_1 & i\geqslant i_1 \end{array}\right\} & (\theta_4<\theta\leqslant\theta_5) \end{cases} \tag{3-75}$$

式中，电流i_1的值一般由定子、转子凸极对准位置时的磁化特性曲线$\Psi=f(i, \theta)\big|_{\theta=\pi/N_r}$决定，取磁化特性曲线开始弯转处的电流。

由 $\Psi(i,\theta)=L(i,\theta)i(\theta)$ 和电感的解析式，可以得到绕组磁链的分段解析式为

$$\Psi(i,\theta)=\begin{cases} L_{\min}i & (\theta_1\leqslant\theta\leqslant\theta_2) \\ \left.\begin{array}{ll} L_{\min}i+K(\theta-\theta_2)i & 0\leqslant i\leqslant i_1 \\ L_{\min}i+K(\theta-\theta_2)i_1 & i\geqslant i_1 \end{array}\right\} & (\theta_2<\theta\leqslant\theta_3) \\ \left.\begin{array}{ll} L_{\max}i & 0\leqslant i\leqslant i_1 \\ L_{\min}i+i_1(L_{\max}-L_{\min}) & i\geqslant i_1 \end{array}\right\} & (\theta_3<\theta\leqslant\theta_4) \\ \left.\begin{array}{ll} L_{\max}i-K(\theta-\theta_4)i & 0\leqslant i\leqslant i_1 \\ L_{\max}+L_{\min}i-L_{\min}-K(\theta-\theta_4) & i\geqslant i_1 \end{array}\right\} & (\theta_4<\theta\leqslant\theta_5) \end{cases} \tag{3-76}$$

电磁转矩的瞬时值表达式可表示为

$$T_{\mathrm{e}}=\begin{cases} 0 & (\theta_1\leqslant\theta\leqslant\theta_2) \\ \left.\begin{array}{ll} Ki^2/2 & 0\leqslant i\leqslant i_1 \\ Kii_1 & i\geqslant i_1 \end{array}\right\} & (\theta_2<\theta\leqslant\theta_3) \\ 0 & (\theta_3<\theta\leqslant\theta_4) \\ \left.\begin{array}{ll} -Ki^2/2 & 0\leqslant i\leqslant i_1 \\ -Kii_1 & i\geqslant i_1 \end{array}\right\} & (\theta_4<\theta\leqslant\theta_5) \end{cases} \tag{3-77}$$

根据式(3－77)可以得出如下结论。

(1) 电磁转矩与电流的方向无关，与电流的大小有关。当电流较小时，磁路处于非饱和区，电磁转矩的大小与电流的平方成比例；当电流较大时，磁路处于饱和区，电磁转矩的大小与电流成比例关系。

(2) 表达式中的正负代表转矩的方向。在电感曲线的上升段，绕组中通电所产生的电磁转矩为正，推动转子旋转；在电感曲线的下降段，绕组中通电所产生的电磁转矩为负，对转子旋转有阻力作用；在电感曲线的恒值区，即当电感为最大值或最小值时，电磁转矩为零，在这个阶段电磁转矩对转子无作用力。

因此，选择不同时刻对电动机绕组通电，就能产生不同方向及大小的电磁转矩，从而使转子正向或反向、加速或减速运行。

3. 开关磁阻电动机的非线性模型

非线性模型是将磁链用非线性函数进行拟合，拟合的精度取决于函数的选定，一般可对电感进行非线性拟合。它能够准确地描述电动机的磁链和转矩特性，精度较高，但因为磁链和转矩都是非线性方程，无法求出其解析解，因此计算相对复杂，特别是对于单片机控制而言。故非线性模型只适宜用于电动机性能计算和仿真。

利用傅里叶级数分解式(3－67)，并且忽略高次谐波，电动机单相绕组电感随着转子位置的变化用一个恒定分量和一个基波分量来表示，即

$$L_j(\theta)=L_0+L_1\cos(N_{\mathrm{r}}\theta+\pi+\varphi_j) \tag{3-78}$$

式中，L_0 为单相电感的恒定分量的幅值；L_1 为单相电感的基波分量的幅值。

L_0 和 L_1 可根据式(3－79)计算。

$$\begin{cases} L_0=(L_{\max}+L_{\min})/2 \\ L_1=(L_{\max}-L_{\min})/2 \end{cases} \tag{3-79}$$

电感随电流变化是非线性的，可以用多项式级数近似表达，即

$$L_{max} = \sum_{n=0}^{N} a_n i^n \tag{3-80}$$

通过改变 N 值比较不同阶次多项式逼近 $L_{max}(i)$ 的能力，从而确定 N 值用于原多项式级数以表达 $L_{max}(i)$ 和相电流的非线性关系。

由式(3-78)和式(3-80)可以得到

$$\frac{\partial L_j(\theta)}{\partial \theta} = -L_1 N_r \sin(N_r\theta + \pi + \varphi_j) = \left(\sum_{n=0}^{N} a_n i^n - L_{min}\right) N_r \sin(N_r\theta + \varphi_j) \tag{3-81}$$

$$\frac{\partial L_j(\theta)}{\partial i} = \sum_{n=0}^{N} a_n i^{n-1}/n[1/2 + \cos(N_r\theta + \pi + \varphi_j)/2] \tag{3-82}$$

非线性电磁转矩可表示为

$$T_j = \int_0^i \frac{\partial L_j}{\partial \theta} i\,\mathrm{d}i = N_r \sin(N_r\theta + \varphi_j)\left[\sum_{n=0}^{N} a_n i^{n+2}/(n+2) - L_{min} i^i/2\right] \tag{3-83}$$

式中，$j=1$、2、3、4，代表电动机的每一相，则有

$$\varphi_j = \begin{cases} 0 & (j=1) \\ \pi/2 & (j=2) \\ \pi & (j=3) \\ 3\pi/2 & (j=4) \end{cases} \tag{3-84}$$

开关磁阻电动机非线性模型与线性模型相比，精度更高，并且也比较简单，适用于电动机控制分析和理论研究。

3.6.4 开关磁阻电动机的控制

开关磁阻电动机不同于常规的感应电动机，因其自身结构的特殊性，既可以通过控制电动机自身的参数(如开通角、关断角)来实现，也可以用适用于其他电动机的控制理论(如 PID 控制、模糊控制等)，对功率变换器部分进行控制，进而实现电动机的速度调节。

针对开关磁阻电动机自身参数进行控制，目前主要使用的几种基本控制方式有角度位置控制、电流斩波控制和电压控制。

1. 角度位置控制

角度位置控制是加在绕组上的电压一定的情况下，通过改变绕组上主开关的开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off}，来改变绕组的通、断电时刻，调节相电流的波形，实现转速闭环控制。

根据电动势平衡方程可知，当电动机转速较高时，旋转电动势较大，则此时电流上升率下降，各相的主开关器件的导通时间较短，电动机绕组的相电流不易上升，电流相对较小，便于使用角度位置控制方式。

因为开通角和关断角都可调节，角度位置控制可分为变开通角、变关断角和同时改变开通角及关断角三种方式。改变开通角，可改变电流波形的宽度、峰值和有效值的大小，还可改变电流波形与电感波形的相对位置，从而改变电动机的转矩和转速。而关断角一般不影响电流的峰值，但可改变电流波形的宽度及其与电感曲线的相对位置，进而改变电流的有效值。故一般采用改变开通角、固定关断角的控制方式。

根据开关磁阻电动机的转矩特性可知，当电流波形主要位于电感的上升区时，产生的平均电磁转矩为正，电动机运行在电动状态；当电流波形主要位于电感的下降段时，产生的平均电磁转矩为负，电动机工作在制动状态。而通过对开通角、关断角的控制，可以使

电流的波形处在绕组电感波形的不同位置。因此，可以用控制开通角、关断角的方式来使电动机运行在不同的状态。

角度位置控制的优点：转矩调节的范围宽；可同时多相通电，以增加电动机的输出转矩，同时减小了转矩波动；通过角度的优化，能实现效率最优控制或转矩最优控制。

根据上面的分析可知，角度位置控制不适于低速场合。因为在低速时，旋转电动势较小，使电流峰值增大，必须采取相应措施进行限流，故一般用于转速较高的场合。

2. 电流斩波控制

根据电动势平衡方程可知，电动机低速运行特别是起动时，旋转电动势引起的压降很小，相电流上升快，为避免过大的电流脉冲对功率开关器件及电动机造成损坏，需要对电流峰值进行限定，因此，可采用电流斩波控制，以获取恒转矩的机械特性。电流斩波控制一般不会对开通角、关断角进行控制，而直接选择在每相的特定导通位置对电流进行斩波控制。

目前常用的电流斩波控制方案有两种：一是对电流上、下限进行限制的控制；二是限制电流上限值和恒定关断时间的控制。

方案一中，主开关器件在 $\theta=\theta_{on}$ 时导通，绕组电流将从零开始上升，当电流增至斩波电流的上限值时，切断绕组电流，绕组承受反压，电流迅速下降；当电流降至斩波电流的下限值时，绕组再次导通，重复上述过程，从而形成斩波电流，直至达到 $\theta=\theta_{off}$ 时实现相关断。方案二同方案一的区别在于，当绕组电流达到最大限定值后，将主开关关断一个固定的时间后再开通，这样，电流下降的幅度主要取决于电感量、电感变化率、转速等因素。因此该方式的关键在于合理地选取关断时间的长度。

电流斩波控制的优点：适用于电动机的低速调速系统，可以控制电流峰值的增长，并有很好的电流调节作用；因每相电流波形会呈现较宽的平顶状，使得产生的转矩比较平稳，转矩的波动相应地比其他控制方式要小。

然而，由于电流的峰值受到了限制，当电动机转速在负载的扰动作用下发生变化时，电流的峰值无法做出相应的改变，使得系统的特性比较软，因此系统在负载扰动下的动态响应很缓慢。

3. 电压控制

电压控制方式是在保持开通角、关断角不变的前提下，使功率开关器件工作在脉宽调制方式。通过调节 PWM 波的占空比，来调整加在绕组两端电压的平均值，进而改变绕组电流的大小，实现对转速的调节。若增大调制脉冲的频率，会使电流的波形比较平滑，电动机输出功率增大，噪声减小，但对功率开关器件的工作频率的要求就会更加严格。

按照续流方式的不同，该控制方式分为单管斩波和双管斩波两种。单管斩波方式中，连接在每相绕组中的上、下桥臂的两个开关管只有一个处于斩波状态，另一个一直导通。而双管斩波方式中，两个开关管同时导通和关断，对电压进行斩波控制。考虑系统效率等因素，实际应用中一般常用单管斩波方式。

电压控制的优点：通过调节绕组电压的平均值进而调节电流，因此可用在低速和高速系统，而且控制简单。但电压控制的调速范围有限。

在实际的开关磁阻电动机运用中，也可以采用多种控制方式相组合的方法，如高速角度控制和低速电流斩波控制组合，变角度电压斩波控制和定角度电压斩波控制组合等。这

些组合方式各有优势及不足，因此必须针对不同的应用场合和不同的性能要求，合理地选择控制方式，才能使电动机运行于最佳状态。

根据系统性能要求的不同，控制电路的具体结构形式会有很大差异，但一般均应包含以下功能。

(1) 用于接收外部指令信号(如起动、转速、转向信号)的操作电路。

(2) 用于给定量与控制量相比较，并按规定算法计算出控制参数的调节量的调节器电路。

(3) 用于决定控制电路的工作逻辑(如正反转相序逻辑、高低速控制方式)的工作逻辑电路。

(4) 用于检测系统中的有关物理量(如转速、角位移、电流和电压)的传感器电路。

(5) 用于当系统中某些物理量超过允许值时，采取相应保护措施(如过电压保护和过电流保护)的保护电路。

(6) 用于控制各被控量信号的输出电路，如控制功率开关器件的导通与关断。

(7) 用于指示系统的工作状况和参数状态的显示电路，如指示电动机转速、指示故障保护情况的显示。

4. 基于DSP控制器的开关磁阻电动机控制

下面以四相开关磁阻电动机为例说明DSP控制器在开关磁阻电动机控制系统中的应用。

DSP控制器的出现为全数字控制提供了可靠的保证，而开关磁阻电动机系统的位置闭环控制、各相轮流导通的特殊运行方式特别适合采用直接数字控制。一方面，采用直接数字控制可以简化硬件电路，提高系统的可靠性。另一方面，开关磁阻电动机很难建立准确的数字模型，采用直接数字控制便于控制模式的切换和引入现代控制理论与方法，完善信息显示、故障诊断、保护等功能，实现通用化、标准化和智能化。

TMS320LF2407是TMS320x24x系列DSP控制器中面向高性能、高精度应用的产品。基于TMS320LF2407的开关磁阻电动机控制系统硬件如图3.59所示。在本系统中，DSP控制器负责判断转子位置信息，实时计算转速，并综合各种保护信号和给定信息及转速情况给出通断信号，实现数字PI调节并产生定频调宽的PWM信号作为功率的驱动信号。

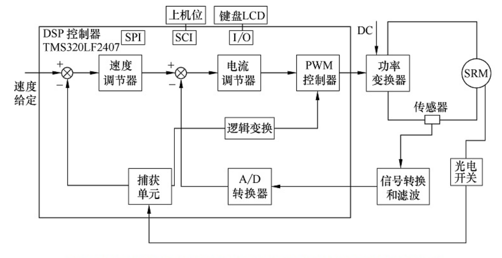


图3.59 基于TMS320LF2407的开关磁阻电动机控制系统硬件

下面简要介绍各功能电路及其与DSP控制器的接口。

(1) 转子位置检测电路

如图3.60所示，四相开关磁阻电动机的两路位置信号分别输入DSP控制器的两个捕获单元CAP1和CAP2。当捕获输入引脚检测到一个转换时，定时器1或2的值被捕获并存储在相应的两级FIFO堆栈中，位置信号的上下跳变均引起捕获单元的中断，即每隔15°产生一次捕获中断，CAP的中断服务程序根据转子的瞬间位置信息确定相应的导通相和关断相，并计算电动机的转速。

(2) PWM输出电路

利用DSP控制器产生PWM信号的方法有几种，此处介绍通过事件管理器模块的全比较单元和相应电路产生PWM信号(PWM1~PWM4)。全比较单元的时基由通用定时器1提供，当通用定时器1的计数值与全比较单元的比较寄存器的值匹配时，相关的输入引脚发生电平跳变。因此，随时改变比较寄存器中的值就可以调节PWM信号输入的占空比。这种软件控制PWM信号的灵活性尤其适用于开关磁阻电动机的控制。

如图3.61所示，利用DSP控制器的比较单元和PWM脉冲发生电路输出PWM信号，PWM信号经施密特触发器整形后，输入EXB841的输入端，控制相应相IGBT(绝缘栅双极晶体管)的通断。

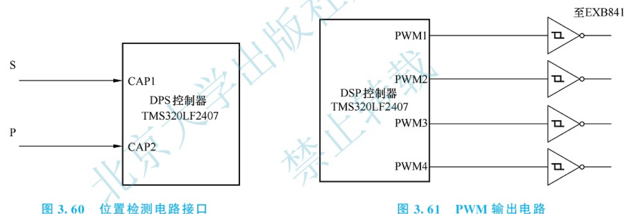


图3.60 位置检测电路接口　　图3.61 PWM输出电路

(3) 电流检测电路

TMS320LF2407内有两个10位8通道A/D转换器，每次A/D转换的最长时间为6.6μs，两个转换器可以并行工作，转换结果存在一个两级FIFO寄存器中。模拟输入引脚ADCIN0~ADCIN7属于模拟转换单元1，ADCIN8~ADCIN16属于模拟转换单元2。ADCIN0、ADCIN1及ADCIN8、ADCIN9与数字I/O模块复用，如果对这些引脚输入的模拟量进行转换，其转换精度低于专用引脚。

电流检测采用两个磁场平衡式霍尔电流传感器，电流传感器的输出经加法器全变换至合适的范围后，输入DSP控制器的ADCIN1、ADCIN2引脚，电流检测电路与DSP控制器的接口如图3.62所示。

下列方程给出了转换公式。

$$\text{数字结果}=1023\times\frac{\text{模拟输入电压}-V_{\text{REFLO}}}{V_{\text{REFHI}}-V_{\text{REFLO}}} \tag{3-85}$$

式中，V_{REFLO}为A/D转换器模拟输入参考电压低电平；V_{REFHI}为A/D转换器模拟输入参考电压高电平。

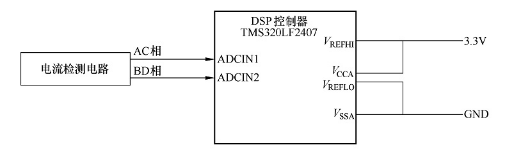


图 3.62　电流检测电路与 DSP 控制器的接口

TMS320LF2407 的供电电源为 3.3V，因此模拟输入的参考电压高电位为 3.3V，低电位为 0V。所以，电流传感器的输出电压应转换到 0～3.3V。

电流检测的采样时间为 50μs，与 PWM 信号频率相同，即在每个 PWM 波周期内完成一次电流 A/D 转换。

(4) 故障检测与保护电路

为保证系统中功率变换电路及电动机驱动电路安全可靠地工作，DSP 控制器提供了引脚 PDPINT(功率驱动保护中断)。当器件引脚 PDPINT 被置为低电平时，将产生一个外部中断。利用它可以方便地实现系统的各种保护功能，具体实现电路如图 3.63 所示。

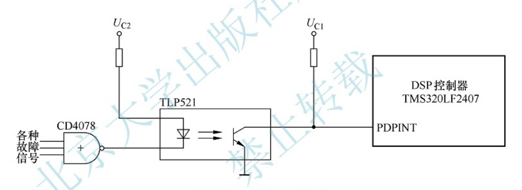


图 3.63　系统保护电路

各种故障信号由或非门 CD4078 综合后，经光电隔离输入 PDPINT 引脚。任何故障状态的出现都将使 CD4078 输出低电平，PDPINT 引脚被拉为低电平，此时 DSP 控制器内定时器立即计数，所有 PWM 输出引脚全部呈高阻态，同时产生中断信号，通知 CPU 有异常情况发生。整个过程不需要程序干预，全部自动完成，这对各种故障状态的快速处理非常有利。

(5) 键盘与显示器接口

从操作的实用性出发，设置八个功能键，分别为启动键、停止键、增值键、减值键、正反转控制键、设置键、确认键和复位键。除复位键外，其余各键均直接连到 DSP 控制器的 I/O 接口线上，复位键连接到 DSP 控制器复位引脚。

采用内置驱动电路的液晶显示器 1602A。1602A 通过 DSP 控制器的通用 I/O 接口驱动。

(6) DSP 最小应用系统

TMS320LF2407 接晶振、复位电路，并外扩 64KB 程序存储器和 64KB 数据存储器构成 DSP 控制器的最小应用系统，具体电路可以参阅有关图书。

下面简要介绍控制策略的实现。

以 TMS320LF2407 为核心的开关磁阻电动机双闭环调速系统控制策略如图 3.64 所示。系统有两个反馈环，即速度外环和电流内环。速度反馈信号取自位置传感器输出的转子位置信号，与给定速度比较后作为速度环 PI 调节器的输入。而转速调节器的输出值作为电流指令值再与电流传感器测出的实际电流相比较，形成电流偏差，以控制 PWM 信号的脉宽。

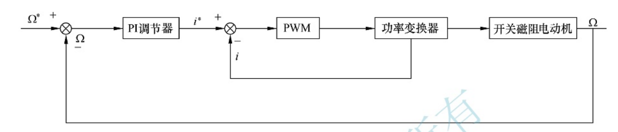


图 3.64　以 TMS320LF2407 为核心的开关磁阻电动机双闭环调速系统控制策略

采用电流斩波控制与角度控制相结合的控制方法，启动时采用两相全开通电流斩波控制；在基速以下，采用变角度斩波方式；基速以上，采用角度位置控制。

转速采样周期为 5ms，电流采样周期为 50μs。转速 PI 调节和电流斩波控制均由软件实现。

为简明起见，采用 PID 算法进行速度闭环调节。由于开关磁阻电动机具有较好的动态特性，实际上只使用了 PI 调节。实施 PI 调节的关键在于比例系数和积分时间常数的整定，它直接影响系统的动静特性和控制品质。由于开关磁阻电动机很难建立准确的数学模型，两个参数实际上要经过反复调试得到。

电流斩波控制采用软件方法实现。在 PWM 脉宽控制中断子程序(通用定时器 1 中断)启动 A/D 转换器单元的 ADCIN2 和 ADCIN3，对电流传感器进行电流采样，读出电流采样值。当此实际电流值大于给定电流值时，就封锁 PWM1～PWM4 输出，关断 IGBT，使相电流下降；当下一个中断到来时，再一次重复上述过程。如果实际电流值小于给定电流值，则重新开放 PWM 输出，从而使相电流得到控制。采用这种软件实现的电流斩波方式可以灵活地改变过电流及启动斩波的电流设定值，节省了外围电路的成本。

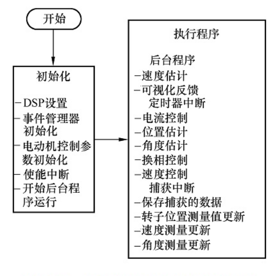


图 3.65　基于 TMS320LF2407 DSP 的开关磁阻电动机控制系统的控制流程

两路转子位置信号分别输入捕获单元 CAP1 和 CAP2，定义跳变检测方式为上升下降沿，则转子每转过 15°，就发生一次捕获中断。因为在捕获单元使能后，输入引脚上的指定跳变将所选通用定时器的计算转入相应的 FIFO 堆栈，所以 FIFO 堆栈记录的数值就反映了转子转过这一角度所用的时间。通过捕获单元测出电动机每转过 15°对应的时钟脉冲数，即可得到每个脉冲对应的角度。

根据上述控制策略，编制的控制软件流程如图 3.65 所示。

软件主要由以下程序模块组成。

（1）主程序。通过调用各子程序，执行相应的控制指令，在后台完成调速功能。

（2）初始化子程序。DSP控制器内部集成了许多外围器件，如A/D转换器、事件管理器等，在系统工作之前，需要对硬件初始化，同时还要对有关控制标志、初始参数、开关量、工作单元、工作模式及中断系统进行初始化，以保证各功能单元按设计要求工作。

（3）定时器中断。完成电流PWM控制、转速PI控制、换相控制及角度和位置的估计功能。

（4）捕获中断。对捕获单元检测的位置信号进行判断并处理。

3.7 轮毂电动机

轮毂电动机技术又称车轮内装式电动机技术，是一种将电动机、传动系统和制动系统融为一体的轮毂装置技术，是现阶段先进电动汽车技术研究的热点之一。



【轮毂电动机电动汽车】

从各种驱动技术的特点和发展趋势来看，采用轮毂电动机技术是电动汽车的最终驱动形式。随着电池技术、动力控制系统和整车能源管理系统等相关技术研发的不断深入，电动机性能的不断提高，轮毂电动机技术将在电动汽车上取得更大的成功。

1. 轮毂电动机的结构形式



【沃尔沃轮毂电动机电动汽车】

轮毂电动机驱动系统（图3.66）通常由电动机、减速机构、制动系统、冷却系统与电子控制器等组成。

图3.67为轮毂电动机驱动系统分解示意图。

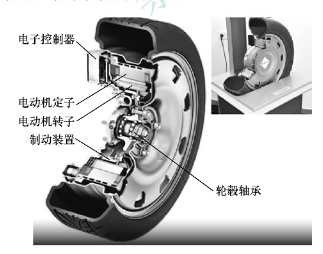


图3.66 轮毂电动机驱动系统结构

轮毂电动机驱动系统根据电动机的转子型式主要分为外转子式和内转子式两种。外转子式轮毂电动机采用低速外转子电动机，电动机的最高转速在1000～1500r/min，无减速机构，车轮的转速与电动机的转速相同。而内转子式轮毂电动机则采用高速内转子电动机，配备固

定传动比的减速器，为获得较高的功率密度，电动机的转速可高达10000r/min；减速机构通常采用传动比在10∶1左右的行星齿轮减速机构，车轮的转速在1000r/min左右。

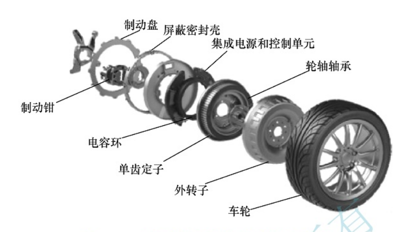


图 3.67　轮毂电动机驱动系统分解示意图

外转子式轮毂电动机的优点是结构简单、轴向尺寸小、比功率高，能在很宽的速度范围内控制转矩，而且响应速度快，外转子直接和车轮相连，没有减速机构，因此效率高；缺点是如要获得较大的转矩，必须增大电动机体积和质量，因而成本高，加速时效率低，噪声大。内转子式轮毂电动机的优点是具有较高的比功率，质量轻，体积小，效率高，噪声小，成本低；缺点是必须采用减速机构，使效率降低，非簧载质量增大，电动机的最高转速受线圈损耗、摩擦损耗及变速机构的承受能力等因素的限制。这两种结构目前在电动汽车中都有应用，但是随着紧凑的行星齿轮变速机构的出现，内转子式轮毂电动机驱动系统在功率密度方面比外转子式轮毂电动机更具竞争力。

轮毂电动机动力系统由于电动机电制动容量较小，不能满足整车制动效能的要求，通常需要附加机械制动系统。轮毂电动机系统中的制动器可以根据结构特点采用鼓式或盘式制动器。由于电动机电制动容量的存在，往往可以使制动器的设计容量适当减小。大多数轮毂电动机系统采用风冷方式进行冷却，也有采用水冷和油冷方式对电动机、制动器等的发热部件进行散热降温，但结构比较复杂。

2. 轮毂电动机的应用类型

轮毂电动机系统的驱动电动机按照电动机磁场的类型分为轴向磁通电动机和径向磁通电动机两类。轴向磁通电动机的结构更利于热量散发，并且它的定子可以不需要铁心；径向磁通电动机的定子与转子之间受力比较均衡，磁路由硅钢片叠压得到，技术更简单、成熟。

轮毂电动机类型主要有永磁式、异步式、开关磁阻式。

无刷永磁同步轮毂电动机可采用圆柱形径向磁场结构或盘式轴向磁场结构，具有较高的功率密度和效率及宽广的调速范围，发展前景十分广阔，已在国内外多种电动汽车中获得应用。

异步轮毂电动机结构简单，坚固耐用，成本低，运行可靠，转矩脉动小，噪声低，不需要位置传感器，转速极限高；但是驱动电路复杂，成本高，相对永磁轮毂电动机而言，效率和功率密度偏低。

开关磁阻轮毂电动机具有结构简单，制造成本低，转速、转矩特性好等特点，适用于电动汽车驱动；但是设计和控制非常困难和精细，运行噪声大。

3. 轮毂电动机的驱动方式

轮毂电动机的驱动方式可以分为直接驱动和减速驱动两种基本形式。

轮毂电动机直接驱动方式如图 3.68 所示，采用低速外转子电动机，电动机与车轮组成一个完整部件总成，电动机布置在车轮内部，直接驱动车轮带动汽车行驶。直接驱动方式的主要优点是电动机体积小，质量轻，成本低，系统传动效率高，结构紧凑，既有利于整车结构布置和车身设计，也便于改型设计。这种驱动方式直接将外转子安装在车轮的轮辋上驱动车轮转动。由于电动汽车在起步时需要较大的转矩，因此安装在直接驱动型电动轮中的电动机必须能在低速时提供大转矩；承载大转矩时需要大电流，易损坏电池和永磁体；电动机效率峰值区域很小，负载电流超过一定值后效率急剧下降。为了使电动汽车能够有较好的动力性，电动机还必须具有很宽的转矩和转速调节范围。由于电动机工作产生一定的冲击和振动，要求车轮轮辋和车轮支撑必须坚固、可靠，同时由于非簧载质量大，要保证电动汽车的舒适性，要求对悬架系统进行优化设计。故此驱动方式适用于平路或负载小的场合。

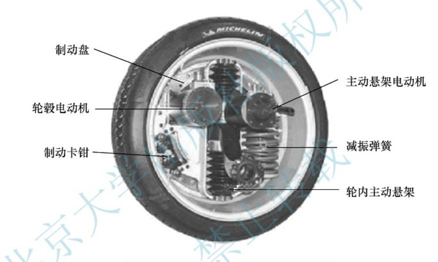


图 3.68 轮毂电动机直接驱动方式

轮毂电动机减速驱动方式如图 3.69 所示，采用高速内转子电动机，适合现代高性能电动汽车的运行要求。减速机构布置在电动机和车轮之间，起减速和增矩的作用，保证电动汽



图 3.69 轮毂电动机减速驱动方式

车在低速时能够获得足够大的转矩。电动机输出轴通过减速机构与车轮驱动轴连接，使电动机轴承不直接承受车轮与路面的载荷作用，改善了轴承的工作条件；采用固定速比的行星齿轮减速器，使系统具有较大的调速范围和输出转矩，消除了车轮尺寸对电动机输出转矩和功率的影响。但电动机内齿轮的工作噪声比较大，并且润滑方面存在很多问题；非簧载质量也比直接驱动方式的大，对电动机及系统内部的结构方案设计要求更高。

从电动汽车各种驱动技术的特点和发展趋势来看，轮毂电动机驱动技术将是未来电动汽车的主要驱动形式。



1. 电动汽车用电动机主要有哪几种？其特点是什么？
2. 电动汽车对电动机有哪些要求？
3. 直流电动机有哪些类型？其运行特性如何？
4. 直流电动机的转速控制方法有哪些？
5. 简述无刷直流电动机的工作原理。其控制方法有哪些？
6. 简述异步电动机的工作原理。其控制方法有哪些？
7. 永磁同步电动机的运行原理与特性如何？
8. 简述开关磁阻电动机的工作原理。其控制方法有哪些？

第 4 章　纯电动汽车

纯电动汽车是指以车载电源为动力，用电动机驱动车轮行驶，符合道路交通、安全法规各项要求的汽车，一般采用高效率充电蓄电池为动力源。纯电动汽车无需使用内燃机，因此，纯电动汽车的电动机相当于传统汽车的发动机，蓄电池相当于原来的油箱，电能是二次能源，可以来源于风能、水能、热能、太阳能等多种方式。

4.1　概　　述

4.1.1　纯电动汽车的分类

纯电动汽车的分类如图 4.1 所示。

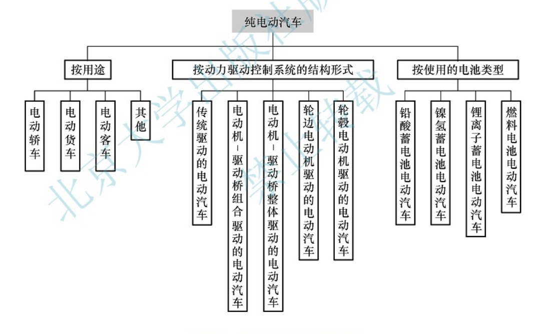


图 4.1　纯电动汽车的分类

此外，目前研究应用的还有使用镍镉蓄电池、钠硫蓄电池、飞轮电池、太阳电池和超级电容器等的纯电动汽车。

4.1.2　纯电动汽车的组成与工作原理

纯电动汽车主要由驱动电动机系统、电源系统、整车控制器和辅助系统等组成，如图 4.2所示。

【电动汽车三电系统】

1. 驱动电动机系统

驱动电动机系统包括驱动电动机、电机控制器及它们工作所必需的辅助装置。



(1) 驱动电动机。驱动电动机的作用是将储存在动力电池中的电能高效地转化为车轮的动能，并能够在汽车减速制动和下坡滑行时，将车轮的动能转化为电能充入动力电池。

(2) 电机控制器。电机控制器是按整车控制器的指令、驱动电动机的转速和电流反馈信号等，对驱动电动机的转速、转矩和旋转方向进行控制。

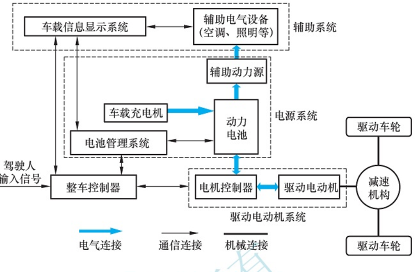


图 4.2　纯电动汽车的组成

2. 电源系统

电源系统主要包括动力电池、电池管理系统、车载充电机及辅助动力源等。

(1) 动力电池。动力电池是电动汽车的动力源，是能量的储存装置，也是目前制约电动汽车发展的关键因素。要使电动汽车与内燃机汽车相竞争，关键是开发出比能量高、比功率大、使用寿命长、成本低的动力电池。

(2) 电池管理系统。电池管理系统实时监控动力电池的使用情况，对动力电池的端电压、内阻、温度、电解液浓度、当前电池剩余电量、放电时间、放电电流或放电深度等动力电池状态参数进行检测，并按动力电池对环境温度的要求进行调温控制，通过限流控制避免动力电池过充电，对有关参数进行显示和报警，其信号流向辅助系统的车载信息显示系统，以便驾驶人随时掌握并配合操作，按需要及时对动力电池充电并进行维护保养。

(3) 车载充电机。车载充电机是把电网供电制式转换为符合动力电池充电要求的制式，即把交流电转换为相应电压的直流电，并按要求控制其充电电流。

(4) 辅助动力源。辅助动力源是供给电动汽车其他各种辅助装置所需的动力电源，一般为12V或24V的直流低压电源。它主要给动力转向、制动力调节控制、照明、空调、电动门窗等各种辅助装置提供所需的能源。

3. 整车控制器

整车控制器是电动汽车的“大脑”，是实现整车控制决策的核心电子控制单元。它根据驾驶人传达给加速踏板和制动踏板的信号，向电机控制器发出相应的控制指令，对驱动电动机进行起动、加速、减速、制动控制。当电动汽车行驶时，储存在动力电池中的电能通过电机控制器输送给驱动电动机，驱动电动机将电能高效地转化为驱动车轮的动能，使车轮转动。在电动汽车减速和下坡滑行时，整车控制器配合电池管理系统进行发电回馈，使动力电池反向充电。对于与汽车行驶状况有关的速度、功率、电压、电流及有关故障诊断等信息还需传输到车载信息显示系统进行相应的数字或模拟显示。

4. 辅助系统

辅助系统包括车载信息显示系统、电动转向系统、电控制动系统、电动空调系统、照明及

除霜装置、刮水器和收音机等。借助辅助系统可以提高电动汽车的操纵性和乘员的舒适性。

4.1.3 纯电动汽车驱动系统的布置形式

纯电动汽车的驱动系统是电动汽车的核心部分，其性能决定着纯电动汽车的运行性能。纯电动汽车的驱动系统布置取决于电动机驱动系统的方式，可以有多种形式。常见的纯电动汽车驱动系统的布置形式如图 4.3 所示。

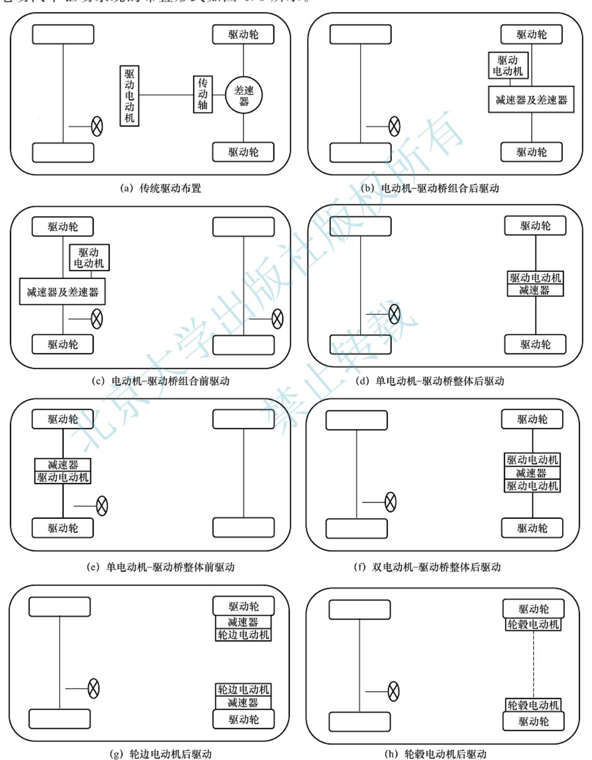


图 4.3 常见的纯电动汽车驱动系统的布置形式

（1）传统驱动布置形式。传统驱动布置形式与传统内燃机汽车后轮驱动系统的布置形式基本一致，将发动机换成驱动电动机，去掉变速器和离合器，使驱动电动机和传动轴直接相连，后驱动桥不变，一般用于改造型电动汽车。

（2）电动机-驱动桥组合驱动布置形式。电动机-驱动桥组合驱动布置形式取消了离合器、变速器和传动轴，但具有减速差速机构，把驱动电动机、固定速比的减速器和差速器集成为一个整体，通过两个半轴来驱动车轮。此种布置形式的整个传动长度比较短，传动装置体积小，占用空间小，容易布置，可以进一步降低整车的质量；但对驱动电动机的要求较高，不仅要求驱动电动机具有较高的起动转矩，而且要求其具有较大的后备功率，以保证电动汽车的起动、爬坡、加速超车等动力性。

（3）电动机-驱动桥整体驱动布置形式。单电动机-驱动桥整体驱动布置形式取消了机械式差速器，采用一个驱动电动机，通过固定的减速器，驱动两个车轮。双电动机-驱动桥整体驱动布置形式取消了机械式差速器，两个驱动电动机通过固定速比的减速器分别驱动两个车轮；每个驱动电动机的转速可以独立地调节控制，便于实现电子差速。电子差速器的优点是体积小，质量轻，在汽车转弯时可以实现精确的电子控制，提高了电动汽车的性能。

（4）轮边电动机驱动布置形式。轮边电动机与减速器集成后融入驱动桥上，采用刚性连接，减少高压电器数量和动力传输线路长度；优化后的驱动系统可降低车身高度、提高承载量、提升有效空间。

（5）轮毂电动机驱动布置形式。轮毂电动机直接安装在车轮上，大大减少了零部件数量和动力系统的体积，使汽车的动力系统变得更加简单，大大提高了车内空间的实用性和利用率。

4.1.4 纯电动汽车的特点

1. 无污染，噪声低

纯电动汽车无内燃机汽车工作时产生的废气，不产生排气污染，对环境保护和空气的洁净是十分有益的，有“零污染”的美称；纯电动汽车无内燃机产生的噪声，电动机的噪声也较内燃机小。但是，使用纯电动汽车并非绝对无污染，如使用铅酸蓄电池作为动力源，制造、使用中要接触到铅，充电时产生酸气，会造成一定的污染；蓄电池充电所用的电力，在用煤炭作为燃料时会产生 CO、SO_2、粉尘等；随着技术的发展，可以用其他电池作为纯电动汽车的电源，如发展水电、核电、太阳能充电等。

2. 能源效率高，多样化

对纯电动汽车的研究表明，纯电动汽车的能源效率已超过汽油机汽车，特别是在城市运行，汽车走走停停，行驶速度不高，纯电动汽车更加适宜。纯电动汽车停车时不消耗电量，在制动过程中，电动机可自动转化为发电机，实现制动减速时能量的再利用。

另外，纯电动汽车的应用可有效地减少对石油资源的依赖，可将有限的石油用于更重要的方面。向蓄电池充电的电力可以由煤炭、天然气、水力、核能、太阳能、风力、潮汐等能源转化而来。除此之外，如果夜间向蓄电池充电，可以避开用电高峰，有利于电网均衡负荷，减少费用。

3. 结构简单，使用维修方便

纯电动汽车较内燃机汽车结构简单，运转、传动部件少，维修保养工作量小；当采用

交流感应电动机时，电动机不需保养维护；更重要的是纯电动汽车易操纵。

4. 动力电源使用成本高，续驶里程短

目前纯电动汽车尚不如内燃机汽车那样技术完善，尤其是动力电源(电池)的寿命短，使用成本高，电池的储能量小，一次充电后行驶里程不理想；而且纯电动汽车的价格较高。但从发展的角度看，随着科技的进步，投入相应的人力、物力，制约纯电动汽车发展的问题会逐步得到解决。扬长避短，纯电动汽车会逐渐普及，其价格和使用成本必然会降低。

4.1.5 纯电动汽车的关键技术

1. 电动机及控制技术

纯电动汽车的驱动电动机属于特种电动机，是纯电动汽车的关键部件。要使纯电动汽车有良好的使用性能，驱动电动机应具有较宽的调速范围及较高的转速，足够大的起动转矩，体积小，质量轻，效率高且有动态制动强和能量回馈的性能。纯电动汽车所用的电动机正在向大功率、高转速、高效率和小型化方向发展。

随着电动机及驱动系统技术的发展，控制系统趋于智能化和数字化。变结构控制、模糊控制、神经网络控制、自适应控制，以及专家系统、遗传算法等非线性智能控制技术，都将应用于纯电动汽车的电机控制系统。它们的应用将使系统结构简单、响应迅速、抗干扰能力强，参数变化具有鲁棒性，可大大提高整个系统的综合性能。

纯电动汽车再生制动控制系统可以节约能源、提高续驶里程，具有显著的经济价值和社会效益。再生制动还可以减少汽车制动片的磨损，降低汽车故障率及使用成本。

2. 电池及管理技术

电池是纯电动汽车的动力源泉，也是一直制约纯电动汽车发展的关键因素。纯电动汽车用电池要求比能量高、比功率大、使用寿命长，但目前的电池能量密度低、电池组过重、续驶里程短、价格高、循环寿命有限。

纯电动汽车车用动力电池经过三代的发展，已经取得了突破性进展，三个时代的基本情况见表4-1。

表4-1 纯电动汽车用动力蓄电池发展历程

时代	所用动力电池	特点	评价或发展前景
第一代	铅酸蓄电池	比能量较高、价格低、能高倍率放电	目前唯一能大批量生产的纯电动汽车用电池
第二代	碱性电池（主要有镍镉蓄电池、镍氢蓄电池、钠硫蓄电池、锂离子蓄电池和锌空气电池等）	比能量和比功率高于铅酸蓄电池，动力性能和续驶里程提高，价格高于铅酸蓄电池	目前关键是要降低批量化生产的成本，搞高电池的可靠性、一致性及寿命
第三代	燃料电池	能量转化率、比能量和比功率都高，并且可以控制反应过程，能量转换过程可以连续进行	理想的汽车用电池

电池的性能直接影响整车的加速性能、续驶里程及制动能量的回收效率等。电池的成本和循环寿命直接影响汽车的成本和可靠性，所有影响电池性能的参数必须得到优化。纯电动汽车的电池在使用中发热量很大，电池温度影响电池的电化学系统的运行、循环寿命和充电可接受性、功率和能量、安全性和可靠性。所以，为了达到最佳的性能和寿命，需将电池包的温度控制在一定范围内，减小包内不均匀的温度分布以避免模块间的不平衡，以此避免电池性能下降，并且可以消除相关的潜在危险。由于电池包的设计既要密封、防水、防尘、绝缘等，又要考虑空气流流场分布、均匀散热，因此电池包的散热通风设计，成为纯电动汽车研究的一个重要领域。

3. 整车控制技术

新型纯电动轿车整车控制系统是两条总线的网络结构，即驱动系统的高速CAN总线和车身系统的低速总线。高速CAN总线每个节点为各子系统的电子控制单元。低速总线按物理位置设置节点，基本原则是基于空间位置的区域自治。

实现整车网络化控制，其意义不只是解决汽车电子化中出现的线路复杂和线束增加问题，网络化实现的通信和资源共享能力成为新的电子与计算机技术在汽车上应用的一个基础，同时也为X-by-Wire技术提供了有力的支撑。

4. 整车轻量化技术

整车轻量化始终是汽车技术重要的研究内容。纯电动汽车由于布置了电池组，整车质量增加较多，轻量化问题更加突出，但可以采用以下措施减轻整车质量。

(1) 通过对整车实际使用工况和使用要求的分析，对电池的电压、容量，驱动电动机的功率、转速和转矩，整车性能等汽车参数进行整体优化，合理选择电池和电动机参数。

(2) 通过结构优化和集成化、模块化优化设计，减轻动力总成、车载能源系统的质量。这里包括对电动机及驱动器、传动系统、冷却系统、空调和制动真空系统的集成和模块化设计，使系统得到优化；对电池、电池箱、电池管理系统、车载充电机组成的能源系统的合理集成和分散，实现系统优化。

(3) 积极采用轻质材料，如电池箱的结构框架、箱体封皮、轮毂等采用轻质合金材料。

(4) 利用CAD技术对车身承载结构件(如前后桥，新增的边梁、横梁)进行有限元分析研究，用计算和试验相结合的方式，实现结构最优化。

4.2 纯电动汽车传动系统参数设计

纯电动汽车动力传动系统的设计应该满足汽车对动力性能和续驶里程的要求。汽车行驶的动力性能可以用以下指标来评价。

(1) 起步加速性能：纯电动汽车由静止起步并以最大的加速度加速到某一车速或在某一预定的距离加速行驶所需的最短时间。

(2) 最高车速稳定行驶的能力：在水平、良好的路面上，电动机发出的功率应该能够维持纯电动汽车以最高车速行驶的能力。

(3) 额定车速稳定行驶的能力：对纯电动汽车来说，电池和电动机提供的全部功率能满足纯电动汽车以额定车速稳定行驶的能力。

（4）最大爬坡能力：纯电动汽车提供的功率能使其爬上最大坡度路面的能力。

除此之外，纯电动汽车上电池组的能量应该能够维持行驶一定的续驶里程。

4.2.1 电动机参数设计

电动机参数设计主要包括设计电动机的额定功率和峰值功率、最高转速和额定转速、最大转矩及额定电压等参数。

1. 电动机的额定功率和峰值功率

电动机是纯电动汽车行驶的动力源，对整车的动力性有直接影响。所选的电动机功率越大，整车的动力性也就越好，但是如果功率过大，电动机的质量和体积也会增大，而且电动机的工作效率不高，这样就不能充分利用有限的车载能源，从而使续驶里程降低。因此，设计电动机功率参数时通常参考汽车的最高车速、最大爬坡度和加速性能。

（1）**根据电动汽车最高车速确定电动机功率**

设计中初步选择电动机的额定功率应不小于汽车以最高车速行驶时行驶阻力消耗的功率之和，故电动汽车以最高车速行驶消耗的功率为

$$P_{m1} = \frac{u_{max}}{3600\eta_t}\left(mgf + \frac{C_D A u_{max}^2}{21.15}\right) \tag{4-1}$$

式中，m 为整车质量(kg)；f 为滚动阻力系数；C_D 为迎风阻力系数；A 为迎风面积(m^2)；u_{max} 为最高车速(km/h)；η_t 为机械传动系统效率。

（2）**根据纯电动汽车最大爬坡度确定电动机功率**

纯电动汽车以某一车速爬上最大坡度消耗的功率为

$$P_{m2} = \frac{u_p}{3600\eta_t}\left(mgf\cos\alpha_{max} + mg\sin\alpha_{max} + \frac{C_D A u_p^2}{21.15}\right) \tag{4-2}$$

式中，u_p 为纯电动汽车爬坡时的行驶速度(km/h)；α_{max} 为最大爬坡角。

（3）**根据纯电动汽车加速性能确定电动机功率**

纯电动汽车在水平路面上加速行驶消耗的功率为

$$P_{m3} = \frac{u_f}{3600\eta_t}\left(mgf + \frac{C_D A}{21.15}u_f^2 + \delta m\frac{du}{dt}\right) \tag{4-3}$$

式中，δ 为汽车旋转质量换算系数；u_f 为纯电动汽车加速后达到的速度(km/h)；$\frac{du}{dt}$ 为加速度。

电动机额定功率应满足纯电动汽车对最高车速的要求，峰值功率应能同时满足纯电动汽车对最高车速、最大爬坡度和加速度的要求。所以纯电动汽车电动机的额定功率和峰值功率分别为

$$P_e \geqslant P_{m1} \tag{4-4}$$

$$P_{e\,max} \geqslant \max\{P_{m1}\quad P_{m2}\quad P_{m3}\} \tag{4-5}$$

纯电动汽车电动机的峰值功率与额定功率的关系为

$$P_{e\,max} = \lambda P_e \tag{4-6}$$

式中，$P_{e\,max}$ 为电动机的峰值功率；P_e 为电动机的额定功率；λ 为电动机的过载系数。

2. 电动机的最高转速和额定转速

电动机的最高转速与纯电动汽车的最高车速之间的关系为

$$n_{max} = \frac{u_{max}\sum i}{0.377r} \quad (4-7)$$

式中，n_{max} 为电动机的最高转速(r/min)；u_{max} 为纯电动汽车的最高车速(km/h)；$\sum i$ 为传动系统的传动比，一般包括变速器传动比和主减速器传动比；r 为车轮半径(m)。

电动机额定转速为

$$n_e = \frac{n_{max}}{\beta} \quad (4-8)$$

式中，β 为电动机扩大恒功率区系数。β 值越大，转速越低，转矩越高，有利于提高汽车的加速性能和爬坡性能，稳定运行性能也好，但同时功率变换器尺寸也会增大，因此 β 值不宜过高。β 通常取值为 2～4。

3. 电动机的最大转矩

电动机最大转矩的选择需要满足汽车起动转矩和最大爬坡度的要求，同时结合传动系统最大传动比来确定。

$$T_{max} \geqslant \frac{mg(f\cos\alpha_{max} + \sin\alpha_{max})r}{\eta_t i_{max}} \quad (4-9)$$

式中，i_{max} 为传动系统的最大传动比。

4. 电动机的额定电压

电动机的额定电压与电动机的额定功率成正比，额定功率越大，额定电压也就越大。电动机额定电压的选择与纯电动汽车电池组的电压有密切的关系。因此，要选择合适的电池组的电压和电流，以满足整车能源的需要。不过额定电压是由所选取的电动机的参数来决定的。

4.2.2 传动系统传动比设计



【纯电动汽车动力系统匹配】

在电动机输出特性一定时，传动系统的传动比如何选择，依赖于整车的动力性指标要求，即电动汽车传动比的选择应该满足汽车最高期望车速、最大爬坡度及加速时间的要求。

1. 传动系统传动比的上限

传动系统传动比的上限由电动机最高转速和汽车最高车速确定。

$$\sum_{min} i \leqslant \frac{0.377 n_{max} r}{u_{max}} \quad (4-10)$$

2. 传动系统传动比的下限

传动系统传动比的下限由下述两种方法算出的传动系统速比的最大值确定。

由电动机最高转速对应的输出转矩和汽车最高车速对应的行驶阻力确定的传动系统传动比下限为

$$\sum_{max} i \geqslant \frac{r}{\eta_t T_{u\,max}}\left(mgf + \frac{C_D A u_{max}^2}{21.15}\right) \quad (4-11)$$

式中，$T_{u\,max}$ 为电动机最高转速对应的输出转矩(N·m)。

由电动机的最大转矩和最大爬坡度对应的行驶阻力确定的传动系统传动比下限为

$$\sum_{max} i \geqslant \frac{r}{\eta_t T_{max}}\left(mgf\cos\alpha_{max} + mg\sin\alpha_{max} + \frac{C_D A u_f^2}{21.15}\right) \quad (4-12)$$

式中，T_{max} 为电动机的最大转矩(N·m)。

4.2.3 电池参数设计

动力电池是整车的能量来源，是纯电动汽车的关键部件之一，整车所有的能量消耗都来自电池。因此所选择的电池的类型、质量和各种技术参数都会影响纯电动汽车的整车性能。纯电动汽车动力电池系统的参数匹配主要包括电池的类型、电池组的数目、电池组的容量、电池组的电压等参数的选择。

1. 动力电池匹配原则

动力电池类型的选择要符合纯电动汽车的运行要求。纯电动汽车要求动力电池具有较高的比能量和比功率，以满足汽车的续驶里程和动力性的要求，同时也希望动力电池具有与汽车使用寿命相当的充放电循环寿命，拥有高效率、良好的性价比及免维护特性。

动力电池的电压等级要与电动机电压等级相一致且满足电动机电压变化的要求。同时，由于电动空调、电动真空泵和电动转向助力泵等附件也消耗一定的电能，因此电池组的总电压要大于电动机的额定电压。

动力电池一般有能量型与功率型两种，为满足纯电动汽车的行驶要求，采用能量型电池，匹配时主要考查电池的能量，即电池应具有较大的容量，以增加汽车的续驶里程。电池的容量与其功率成正比，容量越大，其输出的功率越大，所以其输出功率能满足整车电力系统的要求。因此主要是根据汽车续驶里程来确定电池的容量，并且确定的电池容量还须符合市场现有产品的标准，并通过对现有产品反复验证进行设计。

2. 动力电池组参数匹配

(1) **动力电池组类型选择**

目前可用于纯电动汽车的动力电池主要有铅酸蓄电池、镍氢蓄电池、锂离子蓄电池和燃料电池。其中锂离子蓄电池的高能量和充放电速度快等优越性能得到越来越多的关注，是目前市场前景非常好的一种产品。

(2) **电池组数目的确定**

电池组数目必须满足电动汽车行驶时所需的最大功率和续驶里程的要求。

满足纯电动汽车行驶时所需的最大功率要求的电池组数目为

$$n_p = \frac{P_{e\,max}}{P_{b\,max}\eta_e\eta_{ec}N} \tag{4-13}$$

式中，$P_{e\,max}$ 为电动机的峰值功率(kW)；η_e 为电动机的工作效率；η_{ec} 为电机控制器的工作效率；$P_{b\,max}$ 为电池的最大输出功率(kW)；N 为单电池组所包含的电池的数目。

满足纯电动汽车续驶里程要求的电池组数目为

$$n_x = \frac{1000SW}{C_sV_sN} \tag{4-14}$$

式中，S 为续驶里程(km)；W 为电动汽车行驶 1km 所消耗的能量(kW)；C_s 为单节电池的容量(A·h)；V_s 为单节电池的电压(V)。

电池组数目为

$$n = \max\{n_p \quad n_x\} \tag{4-15}$$

(3) **电池的容量**

电池的能量为

$$E_{B}=\frac{U_{m}C_{E}}{1000} \tag{4-16}$$

式中，E_B 为电池的能量(kW·h)；U_m 为电池的电压(V)；C_E 为电池的容量(A·h)。

电池的能量应满足

$$E_{B}\geqslant\frac{mgf+C_{D}Au_{a}^{2}/21.15}{3600\times \mathrm{DOD}\eta_{t}\eta_{mc}\eta_{dis}(1-\eta_{a})}\times S \tag{4-17}$$

式中，η_{mc} 为电动机效率；η_{dis} 为电池放电效率；η_a 为汽车附件能量消耗比例系数；DOD 为电池放电深度。

电池的容量应满足

$$C_{E}\geqslant\frac{mgf+C_{D}Au_{a}^{2}/21.15}{3.6\times \mathrm{DOD}\eta_{t}\eta_{mc}\eta_{dis}(1-\eta_{a})U_{m}}\times S \tag{4-18}$$

4.2.4 设计实例

已知纯电动汽车的整车质量为1350kg，滚动阻力系数为0.0144，迎风面积为1.9m²，迎风阻力系数为0.3，轮胎滚动半径为0.28m，最高车速为100km/h，最大爬坡度为20%，续驶里程为150km。根据式(4-1)～式(4-18)对电动汽车动力传动系统参数进行匹配。计算结果如下。

1. 电动机参数

选取交流感应电动机，额定功率 P_e =30kW，峰值功率 $P_{e\max}$ =72kW，过载系数 λ = 2.4，最高转速 $n_{\max}$ =9000r/min。

2. 传动系统传动比

主减速器传动比为4.3245。

采用Ⅲ挡变速器，Ⅰ挡传动比为2.0898，Ⅱ挡传动比为1.4456，Ⅲ挡传动比为1。

3. 电池参数

选择镍氢蓄电池，容量为250A·h，比能量为80W·h/kg，比功率为230W/kg，电池组数目为22。

纯电动汽车传动系统主要参数都是从汽车行驶时所消耗的能量出发推导计算得到的，理论上，它的动力性和续驶里程能够满足设计要求。

4.2.5 性能仿真

纯电动汽车的设计是否满足要求，需要对纯电动汽车的性能进行仿真分析。

基于ADVISOR建立纯电动汽车主要部件及整车仿真模型。整车仿真模型组成如图4.4所示。

1. 电动机仿真模型

纯电动汽车用的交流电动机、控制器仿真模型总成如图4.5所示，包括转动惯量影响模块、转速评价器、转矩限制模块及温度控制器等，交流电动机、控制器仿真模型能够把需求的转速、转矩转化为电能需求并把电能转化为转矩和转速输出。

此仿真模型可以计算牵引电动机的转矩、转速、输入功率，以及对电动机的转矩、转速

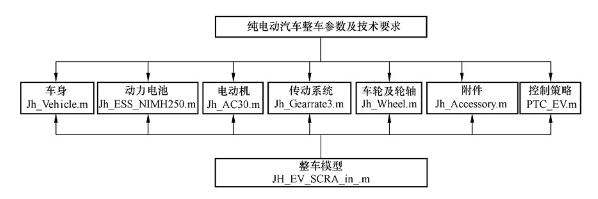


图 4.4 整车仿真模型组成

进行限制，并控制牵引电动机的温度；输入控制电动机的特性，并对转动惯量及电动机温度的影响进行计算，最后得到电动机输出的有效驱动转矩和转速，以及电动机输入的能量。

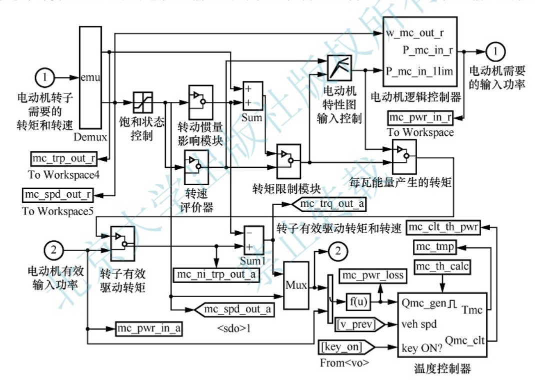


图 4.5 纯电动汽车用的交流电动机、控制器仿真模型总成

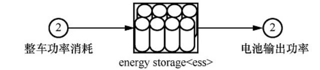
2. 电池仿真模型

电池在充放电时伴随着复杂的化学反应，产生的热量导致电池温度也发生变化。因此电池的电化学特性是一个与各种随机变量相关的非线性函数。实际上，电池动态模型的建立一方面从分析内在机理出发，另一方面借助试验测试来拟合非线性变量之间的关系，建模的基础是确定电动势及内阻的特性函数。

电池仿真模型总成如图 4.6 所示，包括电池电压、内阻计算模块，功率限制模块，负载电流计算模块，荷电状态计算模块，电池散热模块等。

电池所容纳的充电量被看作常数，并受到最小开路电压的限制。电池放电过后需要重新补充的电量受到库仑定律的影响，最大充电量受到电池最大开路电压限制。当电池完全被当作一个已知内阻的电压源时，与之相连的部件(如电动机)被看作耗能元件。电池的输

出功率受等效电路输出的最大功率、电动机功率、控制器接受的最大功率的影响。



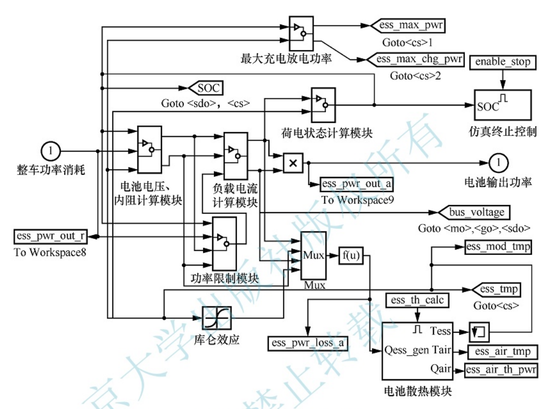


图 4.6 电池仿真模型总成

3. 车身仿真模型

车身仿真模型如图 4.7 所示，包括滚动阻力计算模块、坡度阻力计算模块、迎风阻力计算模块、加速阻力计算模块，以及汽车车速计算模块。

纯电动汽车的车速是评判纯电动汽车的一项重要指标，所以汽车车速计算模块在模型总成中具有相当重要的作用。通过该模块计算出汽车行驶速度，从而推算出汽车的行驶阻力，根据车轮反馈而来的汽车需要的驱动力和线性速度，计算出传递给汽车所需要的驱动力及更新下一刻车速。

4. 主减速器和变速器仿真模型

主减速器仿真模型总成如图 4.8 所示，通过车轮、轮轴传递的主减速器输出端需要的转矩和转速及由变速器反馈而来的转矩和转速，修正主减速器输入端的转矩和转速，算出主减速器输出端的有效转矩和转速。

变速器仿真模型总成如图 4.9 所示，通过主减速器模型传递的变速器输入端需要的转矩和转速及由电动机、控制器模型反馈而来的转矩和转速，修正变速器输入端的转矩和转速，算出变速器输出端的有效转矩和转速。

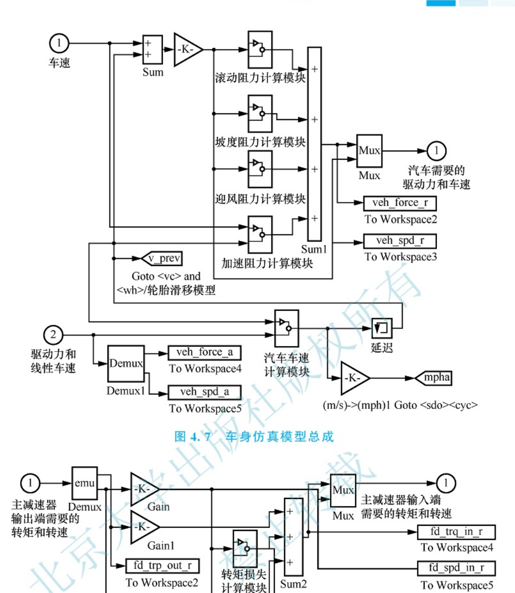


图 4.7 车身仿真模型总成

图 4.8 主减速器仿真模型总成

主减速器仿真模型和变速器仿真模型都具有传递、修正转矩和转速的作用。

5. 纯电动汽车整车仿真模型

将上述各模型封装连接便组成了纯电动汽车的整车仿真模型，如图 4.10 所示。

6. 仿真结果

汽车在实际行驶过程中不可能长时间在稳定车速下行驶，尤其是在市区行驶时，行驶中常常伴有频繁的加速、减速、怠速、停车等行驶工况。行驶工况应该是在对实际路面和

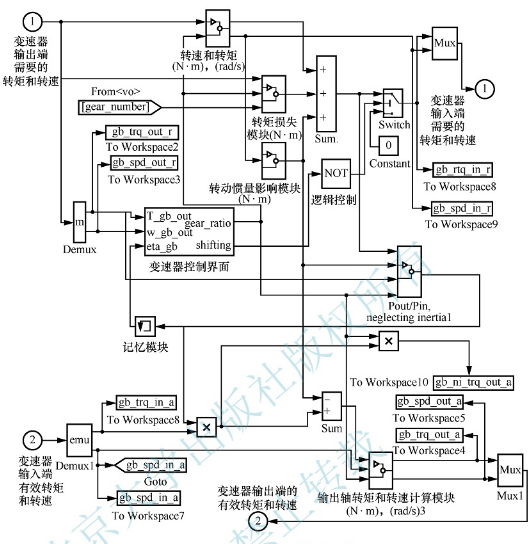


图 4.9　变速器仿真模型总成

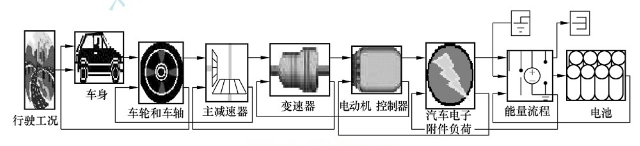


图 4.10　整车仿真模型

交通状况的大量统计的基础上得出的，能够反映汽车在实际使用中的状况。我国尚没有建立准确的、完整的道路行驶工况，所以选用日本 10－15 工况来进行仿真，仿真结果如图 4.11所示。

从图 4.11 所示的车速、荷电状态、转矩、功率变化曲线可以得出如下结论：纯电动汽车的匹配参数满足选择的工况要求，行驶稳定；荷电状态变化较平稳；纯电动汽车得到的转矩、功率满足所需要的动力性要求。

在实际设计中，如果对所设计的电动汽车的性能不满意，可以对传动系统的参数进行优化，直到满意为止。

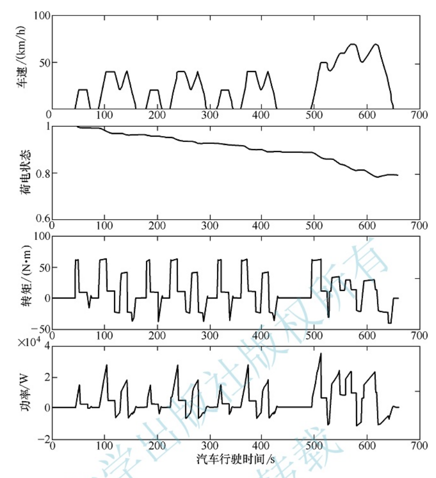


图 4.11　ADVISOR 仿真结果

4.3　纯电动汽车的动力性

纯电动汽车动力性与内燃机汽车动力性的不同之处在于产生驱动力的动力源。内燃机汽车的动力源是发动机，纯电动汽车的动力源是电动机。

4.3.1　电动机外特性

纯电动汽车中驱动电动机的外特性曲线如图 4.12 所示。该曲线分为两个区域：恒转矩区和恒功率区。恒转矩区是从零转速到额定转速，电动机的输出转矩恒定，而功率随转速的提高线性增加；恒功率区是从额定转速到最大转速，电动机的输出功率恒定，而转矩随转速的提高呈双曲线逐渐下降。



【电动机外特性仿真】

驱动电动机的输出转矩为

$$T_s = \begin{cases} T_{emax} & n \leqslant n_e \\ \dfrac{9549P_{emax}}{n} & n > n_e \end{cases} \tag{4-19}$$

式中，T_s 为驱动电动机的输出转矩(N·m)。

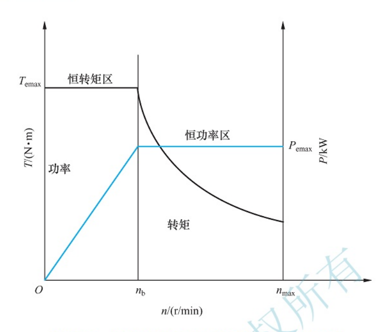


图 4.12　纯电动汽车中驱动电动机的外特性曲线

为了建立驱动电动机外特性的数学模型，需在专门的电动汽车动力测功平台上测试驱动电动机的外特性，然后采用最小二乘法原理对驱动电动机外特性试验数据进行拟合，建立驱动电动机外特性数学模型。驱动电动机外特性数学模型是整车动力性仿真计算的重要依据，是把在电动汽车动力平台上测试的电动机转矩看成电动机转速的函数，其数学模型为

$$T_s = \sum_{i=0}^{k} A_i n^i \quad (i = 0, 1, \cdots, k) \tag{4-20}$$

式中，A_i 为待拟合的各项系数；k 为多项式的阶数，一般取 3～5。

4.3.2　纯电动汽车的驱动力和行驶阻力

纯电动汽车在行驶过程中，动力电池储存的电能通过控制器输出给驱动电动机，驱动电动机输出功率，并且其产生的转矩经传动系统传到驱动轮上。

纯电动汽车的驱动力为

$$F_t = \frac{T_s i_t \eta_t}{r} \tag{4-21}$$

式中，F_t 为纯电动汽车的驱动力。

在恒功率区，纯电动汽车的驱动力是电动机转速的函数。

纯电动汽车的行驶阻力包括滚动阻力、空气阻力、坡度阻力和加速阻力，其表达式和燃油汽车一样，即

$$F_f = mgf\cos\alpha \tag{4-22}$$

$$F_w = \frac{C_D A v^2}{21.15} \tag{4-23}$$

$$F_i = mg\sin\alpha \tag{4-24}$$

$$F_j = \delta m \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} \tag{4-25}$$

式中，F_f 为汽车滚动阻力；F_w 为汽车空气阻力；F_i 为汽车坡度阻力；F_j 为汽车加速阻力。

4.3.3 纯电动汽车的动力性评价指标



【电动汽车动力性仿真】

纯电动汽车的动力性评价指标和燃油汽车一样，也是最高车速、加速能力和爬坡能力。

当纯电动汽车达到最高车速时，电动机处于恒功率区运行，汽车的驱动力与滚动阻力及空气阻力处于平衡状态。求出纯电动汽车驱动力与行驶阻力曲线的交点，便可得到最高车速。

同时，电动机调速所能达到的最高转速，由式（4-7）确定汽车所能达到的最高车速，取两者之中的小者。

图 4.13 为某具有二挡变速器的纯电动汽车的驱动力-行驶阻力平衡图。从图中可以看出一挡、二挡驱动力曲线交点出现在车速约 38km/h 处，当汽车从原地起步加速行驶到此车速时，为了获得最大驱动力，汽车应该从一挡换入二挡。行驶阻力曲线与二挡驱动力曲线存在交点，汽车的最高车速接近 110km/h。

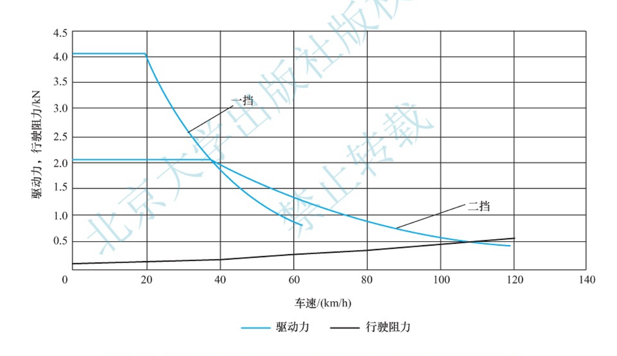


图 4.13 某具有二挡变速器的纯电动汽车的驱动力-行驶阻力平衡图

纯电动汽车行驶加速度为

$$a_j = \frac{F_t - (F_f + F_w)}{\delta m} \tag{4-26}$$

式中，a_j 为纯电动汽车行驶加速度。

电动汽车从静止起步全力加速至速度 v_a 的加速时间为

$$t = \int_0^{v_a} \frac{\delta m}{3.6[F_t - (F_f + F_w)]} dv \tag{4-27}$$

图 4.14 为某具有二挡变速器的纯电动汽车行驶车速-时间曲线。从图中可知，0～

50km/h 的加速时间约为 7.3s，在国家标准规定的 10s 之内；50～80km/h 的加速时间约为 7.5s，在国家标准规定的 15s 之内。

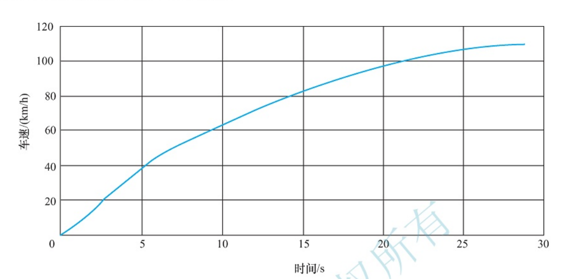


图 4.14　某具有二挡变速器的纯电动汽车行驶车速-时间曲线

纯电动汽车的爬坡能力与驱动电动机的外特性密切相关。纯电动汽车的最大动力因数为

$$D_{\max}=\frac{F_t-F_w}{mg}=\frac{\frac{T_{\text{smax}}i_t\eta_t}{r}-\frac{C_DAv^2}{21.15}}{mg} \tag{4-28}$$

式中，$D_{\max}$ 为纯动电汽车的最大动力因数；T_{smax} 为驱动电动机的最大输出转矩。

纯电动汽车最大爬坡度为

$$i_{\max}=\tan\left(\arcsin\frac{D_{\max}-f\sqrt{1-D_{\max}^2+f^2}}{1+f^2}\right) \tag{4-29}$$

式中，$i_{\max}$ 为最大爬坡度。

图 4.15 所示为某具有二挡变速器的纯电动汽车爬坡度。由图可知，汽车最大爬坡度在 20%以上满足国家标准。汽车通过 4%坡度的行驶车速接近 70km/h，高于国家标准规定的 60km/h；通过 12%坡度的行驶车速约为 36km/h，满足国家标准规定的 30km/h。

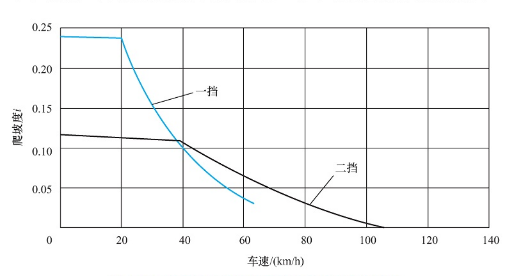


图 4.15　某具有二挡变速器的纯电动汽车爬坡度

纯电动汽车驱动电动机的外特性特征是低速区恒转矩输出，高速区恒功率输出。电动机本身具有很宽的工作范围，基本不必通过变速机构或多挡变速机构即可提供汽车正常行驶所需要的动力性能。因此绘制出来的纯电动汽车驱动力-行驶阻力平衡图、加速度图及爬坡度图比燃油汽车的简单。

4.4 纯电动汽车的经济性

纯电动汽车与燃油汽车在驱动系统、动力源方面存在质的差别，由此导致这两种汽车在经济性评价指标、评价方法上存在很大的差异。动力电池作为纯电动汽车唯一的动力源，能量储存密度不能达到燃油的水平，致使汽车续驶里程短，因此降低能量消耗率、提高能耗经济性对纯电动汽车更加重要。

4.4.1 纯电动汽车的经济性评价指标

纯电动汽车经济性常用的评价指标是以一定的速度或循环行驶工况为基础，衡量汽车行驶一定里程的能量消耗量，主要有续驶里程和单位里程能量消耗率。

续驶里程是纯电动汽车动力电池充满电后可连续行驶的里程，可以分为等速续驶里程和循环工况续驶里程。此项指标对于综合评价纯电动汽车电池、电动机及传动效率、纯电动汽车实用性具有积极意义。但此指标与纯电动汽车电池组装车容量及电池水平有关，在不同车型和装配不同容量电池的同种车型间不具有可比性。即使装配相同容量同种电池的同一车型，续驶里程也受到电池组状态、天气、环境因素等使用条件影响而有一定的波动。

单位里程能量消耗率可分为单位里程电网交流电能量消耗率和电池组直流电能量消耗率。其中电网交流电能量消耗率受不同类型充电设备的效率影响；直流电能量消耗率仅以车载电池组的能量状态作为标准，脱离了充电机的影响，可以比较直接地反映纯电动汽车的实际性能。

电网交流电能量消耗率是指纯电动汽车经过规定的试验循环后对动力电池重新充电至试验前的容量，从电网上得到的电能除以续驶里程所得的值，即

$$E_i = \frac{E_d}{S} \tag{4-30}$$

式中，E_i 为纯电动汽车交流电能量消耗率(W·h/km)；E_d 为动力电池在充电期间来自电网的能量(W·h)。

循环工况续驶里程是指纯电动汽车充满电后，基于一定的运动工况需求进行行驶，所能实现的最大的行驶里程。运动工况主要有 NEDC 循环工况和 60km/h 工况。

纯电动汽车 NEDC 循环工况由四个市区循环工况和一个市郊循环工况组成，理论试验距离为 11.022km，试验时间为 19′40″，如图 4.16 所示。

市区循环工况如图 4.17 所示。

市区循环试验参数见表 4-2。

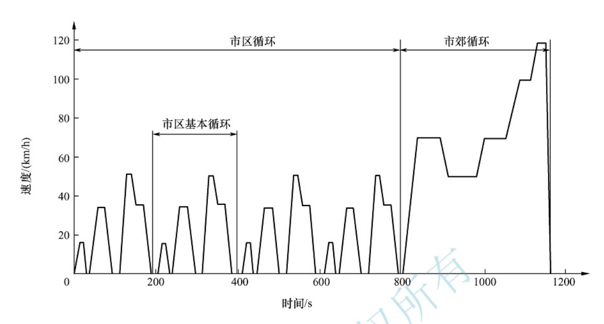


图 4.16　电动汽车 NEDC 循环工况

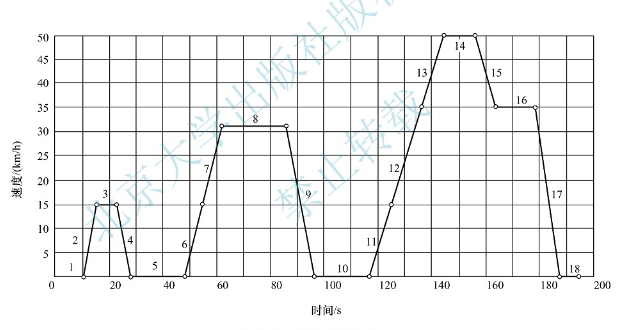


图 4.17　市区循环工况

表 4-2　市区循环试验参数

运转次序	操作状态	工况序号	加速度/(m/s^2)	速度/(km/h)	操作时间/s	工况时间/s	累计时间/s
1	停车	1	0.00	0	11	11	11
2	加速	2	1.04	0→15	4	4	15
3	等速	3	0.00	15	8	8	23
4	减速	4	−0.83	15→0	5	5	28
5	停车	5	0.00	0	21	21	49

续表

运转次序	操作状态	工况序号	加速度/(m/s^2)	速度/(km/h)	操作时间/s	工况时间/s	累计时间/s
6	加速	6	0.69	0→15	6	12	55
7	加速		0.79	15→32	6		61
8	等速	7	0.00	32	24	24	85
9	减速	8	−0.81	32→0	11	11	96
10	停车	9	0.00	0	21	21	117
11	加速	10	0.69	0→15	6	26	123
12	加速		0.51	15→35	11		134
13	加速		0.46	35→50	9		143
14	等速	11	0.00	50	12	12	155
15	减速	12	−0.52	50→35	8	8	163
16	等速	13	0.00	35	15	15	178
17	减速	14	−0.97	35→0	10	10	188
18	停车	15	0.00	0	7	7	195

一个市区循环时间是195s，其中停车60s，占30.77%；加速42s，占21.54%；等速59s，占30.26%；减速34s，占17.44%。一个市区循环的理论行驶距离是1017m，平均速度为18.78km/h。

市郊循环工况如图4.18所示。

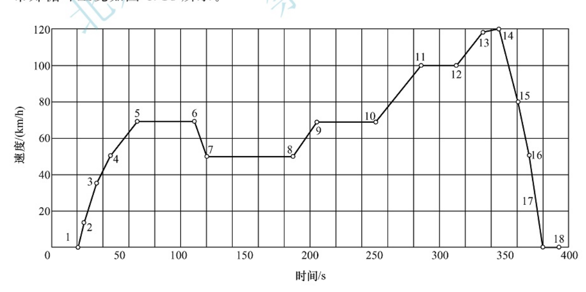


图4.18 市郊循环工况

市郊循环试验参数见表4-3。

表 4-3 市郊循环试验参数

运转次序	操作状态	工况序号	加速度/(m/s^2)	速度/(km/h)	操作时间/s	工况时间/s	累计时间/s
1	停车	1	0.00	0	20	20	20
2	加速	2	0.69	0→15	6	41	26
3	加速		0.51	15→35	11		37
4	加速		0.42	35→50	10		47
5	加速		0.40	50→70	14		61
6	等速	3	0.00	70	50	50	111
7	减速	4	−0.69	70→50	8	8	119
8	等速	5	0.00	50	69	69	188
9	加速	6	0.43	50→70	13	13	201
10	等速	7	0.00	70	50	50	251
11	加速	8	0.24	70→100	35	35	286
12	等速	9	0.00	100	30	30	316
13	加速	10	0.28	100→120	20	20	336
14	等速	11	0.00	120	10	10	346
15	减速	12	−0.69	120→80	16	34	362
16	减速		−1.04	80→50	8		370
17	减速		−1.39	50→0	10		380
18	停车	13	0.00	0	20	20	400

一个市郊循环时间是400s，其中停车40s，占10%；加速109s，占27.25%；等速209s，占52.25%；减速42s，占10.50%。一个市郊循环的理论行驶距离是6956m，平均速度为62.60km/h。

4.4.2 纯电动汽车的经济性计算方法

电网交流电能量消耗率评价指标不仅与纯电动汽车本身的经济性有关，还受电网、充电设备等影响，因此，可以选择以动力电池组的直流电能量消耗率作为评价指标。

纯电动汽车单位里程能量消耗率为

$$E_p = \frac{\int_0^{t_i} P_{ei}\,dt}{S_i} \qquad (4-31)$$

式中，E_p 为纯电动汽车直流电能量消耗率(kW·h/km)；P_{ei} 为汽车工况行驶的功率需求(kW)；t_i 为工况行驶时间(h)；S_i 为工况行驶的距离(km)。

对于加速工况，汽车行驶的功率需求为

$$P_j = \frac{v(t)}{3600\eta_t}\left[mgf + mgi + \frac{C_D A v^2(t)}{21.15} + \delta m a_j\right] \qquad (4-32)$$

式中，P_j 为汽车加速行驶的功率需求(kW)；$v(t)$ 为汽车某时刻的行驶速度(km/h)；i 为坡度；a_j 为加(减)速度(m/s^2)。

汽车某时刻的行驶速度为

$$v(t) = v_0 + 3.6a_jt \tag{4-33}$$

式中，v_0 为加速起始速度(km/h)。

汽车加速工况行驶的距离为

$$S_j = \frac{v_j^2 - v_0^2}{25920a_j} \tag{4-34}$$

式中，S_j 为汽车加速工况行驶的距离(km)；v_j 为加速终了速度(km/h)。

汽车加速时间为

$$t_0 = \frac{v_j - v_0}{3.6a_j} \tag{4-35}$$

将式（4-32）～式（4-35）代入式（4-31），可得纯电动汽车加速工况单位里程能量消耗率为

$$E_j = \frac{1}{\eta_t}\left[\frac{C_DA}{2\times 21.15}(v_j^2 + v_0^2) + (mgf + mgi + \delta ma_j)\right] \tag{4-36}$$

式中，E_j 为纯电动汽车加速工况单位里程能量消耗率。

可以看出，在加速工况，纯电动汽车单位里程能量消耗率是加速段起止速度平方和的函数，在平均速度相同的情况下，加速段起止速度平方和小的能耗低。提高起始速度，增加速度间隔，单位里程能耗都将增加。

对于等速工况，汽车行驶功率需求为

$$P_d = \frac{v_d}{3600\eta_t}\left[mgf + mgi + \frac{C_DAv_d^2}{21.15}\right] \tag{4-37}$$

式中，P_d 为汽车等速行驶的功率需求(kW)；v_d 为汽车等速行驶速度(km/h)。

汽车等速行驶距离为

$$S_d = \frac{v_dt_d}{3600} \tag{4-38}$$

式中，S_d 为汽车等速工况行驶的距离(km)；t_d 为等速行驶时间(s)。

将式（4-37）、式（4-38）代入式（4-31），可得纯电动汽车等速工况单位里程能量消耗率为

$$E_d = \frac{1}{\eta_t}\left(mgf + mgi + \frac{C_DAv_d^2}{21.15}\right) \tag{4-39}$$

式中，E_d 为纯电动汽车等速工况单位里程能量消耗率。

可以看出，在等速工况，纯电动汽车单位里程能量消耗率是速度平方的函数，提高行驶速度，单位里程能耗将增加。

对于减速工况，纯电动汽车减速行驶包含两种情况：一种是滑行减速或无再生制动功能下的制动减速，此时驱动电动机处于关断状态，电能输出为零；纯电动汽车单位里程能量消耗率为零；另一种是有再生制动功能下的制动减速，此时车轮拖动电动机，电动机处于发电机工作状态，纯电动汽车能量消耗为负，即动力电池处于充电工作状态。

对于驻车工况，驱动电动机处于关断状态，纯电动汽车单位里程能量消耗率为零。

因此，纯电动汽车能量消耗主要发生在加速工况和等速工况，减速工况和驻车工况的

能量消耗可忽略不计。

汽车减速工况行驶的距离为

$$S_b = \frac{v_{b0}^2 - v_{bj}^2}{25920a_j} \tag{4-40}$$

式中，S_b 为汽车减速工况行驶的距离(km)；v_{b0} 为减速初速度(km/h)；v_{bj} 为减速终了速度(km/h)。

纯电动汽车整个循环的能量消耗率为

$$E = \frac{\sum E_i S_i}{\sum S_i} \tag{4-41}$$

式中，E 为纯电动汽车整个循环的能量消耗率(kW·h/km)；E_i 为某一工况下的单位里程能量消耗率(kW·h/km)；S_i 为某一工况下的续驶里程(km)。

4.4.3 纯电动汽车的续驶里程



【电动汽车等速工况续驶里程仿真】

汽车在良好的水平路面上一次充电后等速行驶直至消耗掉全部携带的电能为止所行驶的里程，称为等速行驶的续驶里程。它是纯电动汽车的经济性指标之一。

电池携带的额定总能量为

$$E_m = C_m U_m = M_m q \tag{4-42}$$

式中，E_m 为电池携带的额定总能量(W·h)；C_m 为电池的额定容量(A·h)；U_m 为电池的端电压(V)；M_m 为纯电动汽车携带的电池总质量(kg)；q 为电池比能量(W·h/kg)。

等速工况行驶续驶里程为

$$S_{d0} = \frac{E_m v}{P_{md}} \eta_d \tag{4-43}$$

式中，S_{d0} 为汽车等速工况行驶续驶里程(km)。

多工况续驶里程为

$$S = \sum_{i=1}^{k} S_i \tag{4-44}$$

式中，S 为多工况续驶里程(km)；S_i 为每个状态行驶距离(km)；k 为汽车能够完成的状态总数。

纯电动汽车续驶里程的影响因素较复杂，其中最主要的因素是动力电池。续驶里程与纯电动汽车在行驶过程中所消耗的能量密切相关，影响因素主要来自纯电动汽车行驶的外部条件和纯电动汽车本身的结构条件。

1. 滚动阻力系数对续驶里程的影响

轮胎的滚动阻力系数越小，续驶里程越大。所以降低轮胎滚动阻力系数可明显增加电动汽车的续驶里程。特别是对低速、整车质量较大的纯电动汽车，尤其如此。因此，采用滚动阻力系数小的子午线轮胎，增大轮胎气压等是增加纯电动汽车续驶里程的重要途径。

2. 空气阻力系数对续驶里程的影响

空气阻力系数越小，续驶里程越大；速度越高，空气阻力系数对纯电动汽车续驶里程的影响越明显。通过对纯电动汽车进行流线型设计，底部制成光滑表面，同时取消散热器

罩等措施，可以降低空气阻力系数。

3. 机械效率对续驶里程的影响

提高纯电动汽车动力传动系统的机械效率，能有效地增加纯电动汽车的续驶里程。纯电动汽车的整车质量越小，行驶速度越低，机械效率对续驶里程的影响越大。

4. 整车质量对续驶里程的影响

整车质量越大，续驶里程越小；并且不同速度时，续驶里程也不相同。为了降低整车总质量，可通过采用轻质材料的方法实现。

5. 电池参数对电动汽车续驶里程的影响

电池参数包括很多，这里主要从电池的放电深度、电池比能量、电池箱串联电池个数、电池箱并联电池组数、电池的自行放电率等几个方面进行分析。

(1) 电池的放电深度。电池的放电深度越大，纯电动汽车的续驶里程越大；同时，速度和负荷对续驶里程的影响也很明显。

(2) 电池比能量。当纯电动汽车携带的电池总量一定时，电池参数中电池的比能量对续驶里程影响最大，可见提高电池的比能量对提高纯电动汽车的续驶里程意义重大。

(3) 电池箱串联电池个数。增加每个电池箱串联电池的个数，纯电动汽车的续驶里程明显增加。这主要是一方面由于增加了电池的数量，可以增加电池组的总能量储备；另一方面由于电池组的电压增高，在电池放电效率相同的情况下，减小了电池的放电电流，可以增加电池组的有效容量。在增加电池数量的同时，也增加了纯电动汽车的总质量，从而增加了电动汽车的能量消耗，降低了纯电动汽车的续驶里程。但每个电池箱电池数量的增加，会增加电池组的电压，使纯电动汽车的动力性得到提高。因此，纯电动汽车动力传动系统的匹配应兼顾纯电动汽车的续驶里程和动力性。

(4) 电池箱并联电池组数。在保持电池组总电压的情况下，增加并联电池箱的数量可显著增加纯电动汽车的续驶里程。这主要是一方面增加了电池的数量，可增加电池组的总能量储备；另一方面由于并联支路的增加，在各并联支路电池箱不超过额定放电电流的情况下，可以增加电池组总的放电电流，从而增加电池组的额定容量。增加电池箱并联数量，可提高电池组的放电功率，使纯电动汽车的动力性显著提高。因此，增加电池箱并联组数可提高纯电动汽车的动力性和续驶里程。但是，随着电池数量的增加，电池占整车质量的比重和纯电动汽车的总质量也将增大，这将增加纯电动汽车的能量消耗，降低纯电动汽车的续驶里程。

(5) 电池的自行放电率。电池的自行放电率是指在电池的存放期间容量的下降率，即电池无负荷时自身放电使容量损失的速度。显然，自放电率越大，电池在存放期间的容量损失就越多，能量的无用损耗越多，相应的纯电动汽车的续驶里程也就越短。

6. 续驶里程其他影响因素的分析

(1) 行驶工况。行驶工况对电动汽车的续驶里程影响很大。对于恒速行驶，电流随速度的增加而增加，每千米消耗的电能随速度的升高而增加，电池的放电容量则随速度的升高而减小，故其续驶里程随行驶速度的升高而减少。

(2) 行驶环境。在相同的车辆条件下，纯电动汽车行驶的道路情况与环境气候对纯电

动汽车的续驶里程有很大影响。例如，气温的高低一方面对电池的有效容量有很大影响，另一方面也会影响电动汽车的总效率（电动机效率、机械传动效率和电器元件的效率等），以及通风、冷却、空调所消耗的能量。另外，风力的方向与大小，道路的种类（摩擦系数、坡度、平整性）及交通拥挤状况都会使汽车的能量消耗不同，从而使纯电动汽车的续驶里程有显著的差别。

（3）辅助系统和低电压电器系统。纯电动汽车上制动系统的空气压缩机、转向系统的油泵需辅助电动机驱动，其他还有照明、音响、空调、通风、取暖等电器都需要消耗电池的能量。辅助系统和低电压系统的功率越大，消耗的电能就越大，纯电动汽车的续驶里程就越小，动力性能也会受到影响。

由此可见，影响纯电动汽车续驶里程的因素众多，在实际设计中，尽可能综合考虑各种因素的影响，提高纯电动汽车的续驶里程。

4.5　纯电动汽车电池管理系统



【电池管理系统】

电池管理系统是集监测、控制与管理于一体的、复杂的电气测控系统，也是纯电动汽车商品化、实用化的关键。电池管理的核心问题就是荷电状态的预估问题，纯电动汽车电池操作窗荷电状态的合理范围是30%～70%，这对保证电池寿命和整体的能量效率至关重要。纯电动汽车在运行时，电池的放电和充电均为脉冲工作模式，大的电流脉冲很可能会造成电池过充电(SOC＞80%)、深放电(SOC＜20%)甚至过放电(SOC接近0)，因此纯电动汽车的控制系统一定要对电池的荷电状态敏感，并能够及时做出准确的调整，这样电池管理系统才能根据电池容量决定电池的充放电电流，从而实施控制，根据各只电池的容量识别电池组中各电池间的性能差异，并以此做出均衡充电控制和电池是否损坏的判断，确保电池组的整体性能良好，延长电池组的寿命。

准确和可靠地获得电池荷电状态是电池管理系统中最基本和最首要的任务，在此基础上才能对纯电动汽车的用电进行管理，特别是防止电池的过充电及过放电。电池的荷电状态是不能直接得到的，只能通过电池特性——电压、电流、电池内阻、温度等参数来推断。这些参数与荷电状态的关系并不是简单的对应的关系。

4.5.1　电池管理系统的功能

电池管理系统是纯电动汽车的关键组成模块，电池要配备电池管理系统才能正常工作。电池管理系统的功能主要包括以下几项。

1. 实时采集电池系统运行状态参数

实时采集纯电动汽车电池组中的每块电池的端电压和温度、充放电电流及电池组总电压等。由于电池组中的每块电池在使用中的性能和状态不一致，因此对每块电池的电压、电流和温度数据都要进行监测。

2. 确定电池的荷电状态

准确估测动力电池的荷电状态，从而随时预报纯电动汽车储能电池还剩余多少能量或

储能电池的荷电状态，使电池的 SOC＝30％～70％。

3. 故障诊断与报警

当电池电量或能量过低需要充电时，会及时报警，以防止电池过放电而损害电池的使用寿命；当电池的温度过高，非正常工作时，会及时报警，以保证电池正常工作。

4. 电池的热平衡管理

电池热平衡管理系统是电池管理系统的有机组成部分，其功能是通过风扇等冷却系统和热电阻加热装置使电池温度处于正常工作温度范围内。

5. 一致性补偿

当电池之间有差异时，有一定措施进行补偿，保证电池组表现能力更强，并有一定的手段来显示性能不良的电池位置，以便修理替换，一般采用充电补偿功能。可以设计旁路分流电路，以保证每个电池单体都可以充满电，这样可以减缓电池老化的进度，延长电池的使用寿命。

6. 通过总线实现各检测模块和中央处理单元的通信

在纯电动汽车上实现电池管理的难点和关键在于如何根据采集的每块电池的电压、温度和充放电电流的历史数据，建立确定每块电池剩余能量的较精确的数学模型，即准确估计纯电动汽车电池的荷电状态。

目前，主要是根据实际情况，确定具体纯电动汽车的电池管理系统的功能和形式。

这里以镍氢蓄电池为例，简单介绍其电池管理系统的设计。

4.5.2 电池管理系统的硬件实现

硬件的设计取决于管理系统实现的功能。要实现对动力电池的合理管理，即保证采集数据的准确性、可靠稳定的系统通信、抗干扰性。在具体实现过程中，根据设计要求确定需要采集动力电池的数据类型，根据采集量及精度要求确定前向通道的设计，根据通信数据量及整车的要求选用合理的总线。

电池管理系统的结构示意图如图 4.19 所示。

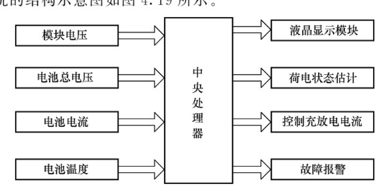


图 4.19 电池管理系统的结构示意图

电池的荷电状态一部分是通过对电流的积分得到的，电流信号检测的精度直接影响系统的荷电状态的准确度，因此要求电流转换隔离放大单元在较大范围内有较高的精度，较快的响应速度，较强的抗干扰能力，较好的零漂、温漂抑制能力和较高的线性度。电流转

换隔离放大单元是用电流性霍尔元件将－400～＋400A 的电流(充电电流为正，放电电流为负)转换为电压信号。电流的采样精度要求为 1%。

电池的温度是判断电池能否正常使用的关键性参数，如果电池的温度超过一定值，有可能造成电池的不可恢复性破坏。电池组之间的温度差异造成电池单体之间的不均衡，从而会造成电池寿命的降低。系统中温度采样，是通过总线数字化温度传感器完成的。温度采样精度可达到 0.5℃。

电压是判断电池组好坏的重要依据，系统要求能得到电池组在同一时刻的电压值的变化和各电池组的值，通过算法来找出有问题的电池组，因此电压的采样精度要求比较高。这里介绍的系统采用的单片机内部自带 A/D 转换功能，电压采样精度可以达到 0.1V。

纯电动汽车中电动机等强电磁干扰源的存在对系统的抗干扰性要求较高，所以要求系统从硬件设计、印制电路板的制作和软件程序方面提高系统的抗干扰性。

硬件系统是在基于 ATMEGA8L 单片机进行设计的。

1. 电压采样的实现

电压采样是对纯电动汽车电池组的电压进行采样，每个电池组由 10 个单体电池构成。本系统中一共有 14 个电池组组成纯电动汽车的动力电池。电压数据采集方案原理框图如图 4.20 所示，每个电池为一个电池组。

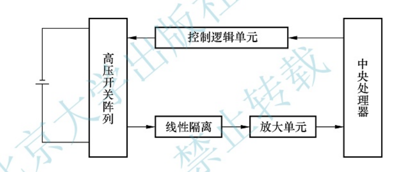


图 4.20　电压数据采集方案原理框图

ATMEGA8L 通过逻辑控制单元，控制高压开关阵列的通断来采样电池组电压，电压信号经过线性隔离器件，再经过放大后输入 ATMEGA8L 的 A/D 转换器。

2. 电流采样的实现

电流的采样是估计电池荷电状态的主要依据，因此对其采样的精度，抗干扰能力，零漂、温漂和线性度误差的要求都很高。在这里采用电流传感器 LT308。该电流传感器是基于霍尔原理的闭环(补偿)电流传感器，具有高的精度、良好的线性度和最佳的反应时间，同时也具有很好的抗干扰能力。其原边的额定电流为 300A，满足系统设计要求。副边的额定电流为 150mA，其转换率为 1∶2000。供电电源为±12V 或±15V。其电路如图 4.21 所示。

电流传感器的输入电流经过可调电阻 R_2 转换为电压信号，可调电阻用于调节电流与其对应的电压之间的比例关系。由于从电流传感器过来的电流是双向的，因此其转换得到的电压是以地(GND)为中心变化的正负电压，而选用的 A/D 转换器是单向的，因此必须将其电压提高至 0V 以上。为此，设计一个加法器(前端的运算放大器)，它的功能是将以 0V 为中心的正负电压提升至以 2.5V 为中心的正电压。后端的运算放大器为反相器，将

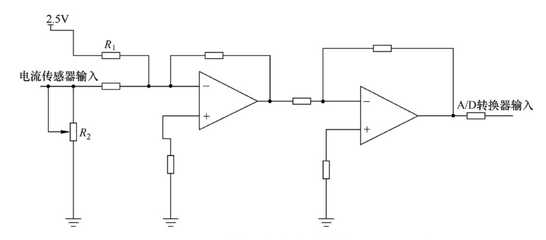


图 4.21 电流采样电路

由加法器得到的负电压转换为正电压，同时起功率放大的作用。通过两级运放，最终将信号变为 0～5V 的标准信号进入 A/D 转换器。

电阻 R_1 前端的 2.5V 电压是通过稳压器件调整得到的，它的稳定性关系到系统零点的稳定，对电流采样有重要的意义。采用高精度的电压参考源 AD580，其输出精度为 2.5V(1±0.4%)，完全满足设计要求。

3. 温度采样的实现

温度传感器采用美国 DALLAS 公司继 DS1820 之后推出的增强型单总线数字温度传感器 DS18B20。该温度传感器在测温精度、转换时间、传输距离、分辨率等方面较 DS1820 有了很大的改进，给用户的使用带来了方便和更令人满意的效果。

温度采样电路如图 4.22 所示。温度检测系统采用直接电源供电方式。当 DS18B20 处于写存储器操作和温度 A/D 转换操作时，总线上必须有强的上拉，上拉开启时间最大为 10μs。由于单线制只有一根线，因此发送接收口必须是三态的。同时由于读写在操作上是分开的，因此不存在信号竞争问题。

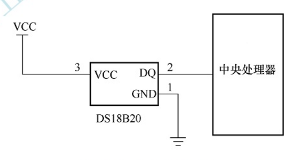


图 4.22 温度采样电路

无论是单点还是多点温度检测，在系统安装及工作之前，都应将主机逐个与 DS18B20 挂接，读出其序列号。

4. 抗干扰措施的设计

由于电池管理系统用在情况比较复杂的纯电动汽车上，因此干扰信号可以沿各种线路侵入单片机系统。其主要的渠道有三条：空间干扰、供电系统干扰和过程通道干扰。干扰信号对单片机系统的作用可以分为三个部位：第一个部位是输入系统，干扰叠加在信号上，使数据采集误差增大，特别在前向通道的传感器接口是小电压信号输入时，此现象会更加严重；第二个部位是输出系统，使各输出信号混乱，不能正常反映单片机系统的真实输出量，导致一系列严重后果；第三个部位是单片机系统的内核，使总线上的数字信号错乱，程序运行失常，内部程序指针错乱，控制状态失灵，单片机中数据被修改，更严重的会导致死机，使系统完全崩溃。

(1) 硬件抗干扰设计

硬件抗干扰效率高，若硬件措施得当，可以将绝大多数干扰拒之门外。硬件抗干扰技术主要有以下几种。

① 电隔离。在输入输出通道上通过光耦器件传输信息可将单片机系统与各种传感器、开关、执行机构从电气上隔离开来，阻挡很大一部分干扰。

② 双绞线传输和终端阻抗匹配。长线传输数字信号时利用双绞线，对噪声干扰有较好的抑制效果；可与光电耦合器或者平衡输入接收器和输出驱动器联合使用；在发送和接收信号端必须有末端电阻，双绞线应该与阻抗匹配。

③ 硬件滤波。RC 低通滤波器可以大大削弱各类高频干扰信号(如各类“毛刺”干扰)。

④ 良好的接地。有两种接地：一种是为人身或设备安全，把设备的外壳接地，这种接地称作外壳接地或安全接地；另一种是为电路工作提供一个公共的电位参考点，这种接地称为工作接地。两种接地系统都要设计合理，同时，系统的数字“地”与模拟“地”要分开。

⑤ 屏蔽。高频电源、交流电源、强电设备、电弧产生的电火花，甚至雷电，都能产生电磁波，从而成为电磁干扰的噪声源；用金属外壳将器件包围起来，再将金属外壳接地，对屏蔽各种通过电磁感应引起的干扰非常有效。

(2) 软件抗干扰设计

在单片机系统中，充分挖掘软件的抗干扰能力可以将干扰的影响抑制到最小。软件抗干扰设计主要是消除模拟输入信号的噪声，程序运行混乱时使程序重新正常运行。

① 数字滤波。数字滤波技术可以有效地消除模拟输入信号的噪声。数字滤波技术有中值滤波、算术平均值滤波和加权平均值滤波等。

② 程序运行监视系统。若失控的程序进入“死循环”，通常采用“看门狗”技术使程序脱离“死循环”。通过不断检测程序循环运行时间，若发现它超过最大循环运行时间，则认为系统陷入“死循环”，并对其进行出错处理。

5. 车载 CAN 通信设计实现

电池管理系统是纯电动汽车车载电气系统的一部分。它与整车控制系统的通信联系是通过 CAN 通信来实现的。在电池管理系统中，CAN 通信的实现是由外围设置 CAN 的控制器和接收器组成的通信模块完成的，其设计原理如图 4.23 所示。

从图 4.23 中可以看出，电路主要由四部分构成：微处理器 ATMEGA8L、CAN 控制器 SAJ1000、CAN 总线驱动器 82C250 和高速光电耦合器 6N137。

为了增强 CAN 总线节点的抗干扰能力，SAJ1000 的 CAN 接口不是直接与 82C250 的 TXD 和 RXD 引脚相连，而是通过高速光电耦合器 6N137 后与 82C250 相连，这样就很好地实现了总线上各 CAN 节点间的电气隔离。同时光电耦合器部分电路所采用的两个电源 VCC 和 VDD 也完全隔离，否则采用光电耦合器就失去了意义。电源的完全隔离是采用两个小功率的隔离电源模块来实现的。这些部分虽然增加了接口电路的复杂性，但是提高了节点的稳定性和安全性。

82C250 与 CAN 总线的接口部分也采用了一定的安全和抗干扰措施。82C250 的 CANH 和 CANL 引脚各自通过一个 5Ω 的电阻与 CAN 总线相连，电阻可起到一定的限流作用，保护 82C250 免受过电流的冲击。CANH 和 CANL 与地之间并联了两个 30pF 的小

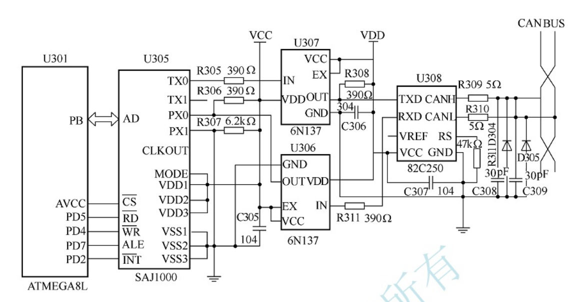


图 4.23　CAN 通信接口设计原理

电容，可起到滤除总线的高频干扰和一定的防电磁辐射的作用。另外，在两 CAN 总线与地之间分别接一个防雷击管，可以防止总线与地之间的瞬间干扰。

4.5.3　电池管理系统的软件实现

电池管理系统的软件主要包括三部分：中央处理单元的管理部分、各电子控制元的测量与控制部分、整个系统的通信部分。

电池管理系统的主要任务是检查电池的电压、电流和温度。通过对测量参数的分析，估计电池的剩余容量并做出各种错误报警。系统软件是基于 ATMEGA8L 的 C 语言实现的，主要包括以下几部分。

（1）系统内存配置。

（2）参数检测及滤波。

（3）剩余容量估计。

（4）CAN 通信。

（5）数据诊断报警。

1. 系统内存配置

ATMEGA8L 有两种类型的存储器：程序存储器(主要包含可执行程序代码)和数据存储器(主要包含外部变量、静态变量、系统堆栈)。由 C 语言生成的每一块程序或数据存放于存储器空间的一个连续的段中。

在编写软件时，应通过伪指令定义段，并给段分配空间，二进制可执行文件是以段的形式存储的。使用段的好处是模块化编程的需要，可以提供灵活方法来管理代码和目标系统内存空间，编者可以自由地决定把哪些代码归属到哪些段。

C 编译器对 C 语言编译生成七个可以进行重定位的代码和数据块，这些块也称段。这些块根据不同的系统配置以不同的方式被放到存储器中。这七个块可以分为两种：一种是已初始化的块，另一种是未初始化的块。已初始化的块主要包含数据表和可执行代码，包括 text、cinit、const 和 switch 四种类型。未初始化的块包括 bss、stack 和 ysmem 三种类

型，它们用于保留存储空间。程序运行时，利用这些空间创建和存储变量。堆栈机制实现以下功能：保护函数的返回地址、分配局部变量、传递函数变量、保护临时结果。堆栈的大小由全局符号 TACK_SIRE 决定。

静态变量和全局变量的存储分配。在 C 程序中说明的每一个外部变量或静态变量都被分配给一个唯一的连续空间，空间的地址由连接器决定，编译器保证这些变量空间分配多个字，以便每个变量按字边界对齐。

使用汇编器可以将汇编语言源程序变为目标文件，用连接器将若干个目标文件连接成可被 CPU 芯片执行的可执行文件。这些目标文件的格式为通用目标文件格式(coff)。连接器通过连接 coff 目标文件建立可执行文件，目标文件中的段是连接时的重要依据，连接器可把段定位到用户系统已配置的存储器中。芯片的存储器配置随应用的不同而不同。用户可以通过 cmd 连接命令文件用连接器伪指令 MEMORY 确定目标系统的各种内存配置。当决定了存储器的模式后，可以用连接器伪指令 SECTIONS 确定连接器组合输入端的方法和输出端在存储器中的位置。

coff 文件会使模块编程和管理变得更加方便，连接器根据连接命令(cmd)文件，将一个或多个 coff 文件连接起来，并将各个文件的各个段配置到目标系统的存储器中对各个符号和段进行重定位。

2. 参数检测及滤波

电压、电流的检测都是通过 A/D 转换中断采集的。A/D 转换结果为 10 位，存放于 A/D 转换器数据寄存器 ADCH 及 ADCL 中。默认情况下转换结果为右对齐但可通过设置 ADMUX 寄存器的 ADLAR 变为左对齐。在此设计中，采用默认右对齐模式。在读 ADCH 之前又有一次 A/D 转换结束，数据寄存器的数据不会更新，从而保证了转换结果不丢失。ADCH 被读出后，A/D 转换器即可再次访问 ADCH 及 ADCL 数据寄存器。A/D 转换结束可以触发中断。即使由于转换发生在读取 ADCH 与 ADCL 之间而造成 A/D 转换器无法访问数据寄存器，并因此丢失了转换数据，中断仍将触发。向 A/D 转换器 ADCS-RA 寄存器的启动转换位即 ADSC 位写“1”可以启动单次转换。在转换过程中此位保持为高，直到转换结束，然后被硬件清零。如果在转换过程中选择了另一个通道，那么 A/D 转换器会在改变通道前完成这一次转换。

使用 A/D 转换中断标志(ADIF)作为触发源，可以在正在进行的转换结束后即开始下一次转换。之后 A/D 转换器便工作在连续转换模式，持续地进行采样并对 A/D 转换器数据寄存器进行更新。第一次转换通过向 ADCSRA 寄存器的 ADSC 位写“1”来启动。在此模式下，后续的 A/D 转换不依赖于 A/D 转换器中断标志是否置位。在此设计中采用连续中断模式，以保证数据更新速度和及时性。在中断服务程序中，采集多组数据，剔除两端极值，然后对数据进行平均滤波。在温度数据采集中也同样经过滤波处理。

3. 剩余容量估计

剩余容量估计在系统软件中分三部分：开机参数初始化、数据采集及电流积分、根据估计模型计算。

4. CAN 通信

CAN 通信是电池管理系统与整车控制单元进行通信的中介。电池管理系统把电池的

荷电状态、温度及相关报警信息发送到CAN总线上，中央控制单元接收到数据后对数据进行处理，进行对整车的控制。在系统中，CAN总线以报文为单位进行数据传输，节点对总线的访问采取位仲裁方式。报文起始发送节点标识符分为地址标识符和功能标识符，CAN协议的最大特点是打破了传统的节点地址编码方式，扩展了对系统数据进行编码方式。采用这种方式可使不同的节点同时接收到相同的数据。数据标识符的值越小，帧数据的优先级越高。CAN控制器监听总线的电平决定发送数据是否有效。

CAN总线智能节点的软件设计主要包括三大部分：CAN节点初始化、报文发送和报文接收。熟悉这三部分程序设计，就能编写出利用CAN总线进行通信的一般应用程序。当然，如果将CAN总线应用于比较复杂的系统中，还应该详细地了解有关CAN总线错误处理、总线关闭处理等方面的知识。

CAN通信初始化过程只有在复位模式下进行，主要包括工作方式的设置、接收滤波方式的设置、接收屏蔽寄存器和接收代码寄存器的设置等。在完成SAJ1000的初始化设置后，SAJ1000就可以回到工作状态，进行正常的通信任务。

5. 数据诊断报警

在此电池管理系统中，对电池组相关数据的分析处理是关键，也是电池管理系统的核心所在，这中间涉及温度的诊断、电压高低的诊断、电池组好坏的诊断等，并且要在危险情况下做出紧急处理和报警。

如在温度诊断中，利用总线式温度传感器对电池温度进行检测，当温度脱离设定的上下限区间后，要断开电池组的充电电路。

电压高低也要做相应诊断，以免纯电动汽车电池组出现过充电或坏电池现象。对于电池组中出现坏电池现象，也在程序中提出了相应的算法，以发现坏电池所在电池组，并显示在液晶屏中，方便人们换电池组。

4.6 纯电动汽车制动能量回收系统

制动能量回收是把汽车制动时的一部分动能转化为其他形式的能量储存起来，在减速或制动的同时达到回收制动能量的目的，然后在汽车起步或加速时又释放储存的能量。制动能量回收对于提高纯电动汽车的能量利用率具有重要意义。国外有关研究表明，在存在较频繁的制动与起动的城市工况运行条件下，有效地回收制动能量，可使纯电动汽车的能量消耗降低约15%，行驶里程延长10%～30%。



【纯电动汽车制动能量回收】



【纯电动汽车制动能量回收系统】

下面以四轮轮毂电动机驱动的纯电动汽车为例，介绍纯电动汽车制动能量回收系统。

4.6.1 纯电动汽车制动能量回收系统的结构

纯电动汽车制动能量回收系统主要由两部分组成：电机再生制动部分和传统液压摩擦制动部分。所以，该制动系统可以视为机电复合制动系统。

再生制动虽然可以回收制动能量并向车轮提供部分制动力，但是其无法使得车轮完全

停止转动，制动效果受到电动机、电池和车速等诸多条件的限制，在紧急制动和高强度制动条件下不能独立完成制动要求。因此，为了保证汽车的制动安全性能，在采用电机再生制动的同时，必须使用传统的液压摩擦制动作为辅助，以达到既保证汽车的制动安全性，又可回收可观能量的目的。

纯电动汽车再生制动是利用电动机的电动机/发电机可逆性原理来实现的。在纯电动汽车需要减速或者滑行时，可以利用驱动电动机的控制电路实现电动机的发电运行，使减速制动时的能量转换为对蓄电池充电的电流，从而得到再生利用。由于摩擦制动一般采用液压形式，因此所提到的机电复合制动系统常称为再生-液压混合制动系统。从保证制动安全和提高能量利用率的角度来考虑，再生-液压混合制动系统是最适合纯电动汽车的综合制动系统。

纯电动汽车的制动系统为双回路液压制动系统＋电动真空助力＋电机再生制动。

纯电动汽车的制动助力采用电动真空助力，保证踏板力与习惯大小相符，并且具有一定的制动脚感。同时，由于前后轮均采用盘式制动器，因此需要加装驻车制动器部分。

制动过程中，制动控制器根据制动踏板的开度(实际为主缸压力)，判断整车的制动强度，确定相应的摩擦制动和再生制动的分配关系。前后轴的摩擦制动分配关系由液压系统对前后轮的分配关系实现；制动控制器根据制动强度和电池的SOC值确定可以输出的制动转矩并对前后轴进行分配，然后通过电机控制器控制电动机进行再生制动。在整个制动的过程中，要保证纯电动汽车的制动稳定性、平稳性，并尽可能多地回收制动能量，延长汽车行驶里程。

4.6.2 纯电动汽车制动能量回收系统的原理

纯电动汽车制动能量回收系统的结构原理如图4.24所示。纯电动汽车的制动过程是由液压摩擦制动与电机再生制动协调作用完成的。再生制动系统主要是由轮毂电动机、电机控制器、逆变器、制动控制器、动力电池及能量管理系统等组成的。汽车进行制动时，制动控制器根据不同的制动工况发出不同的指令，通过电机控制器控制轮毂电动机，进行再生制动。

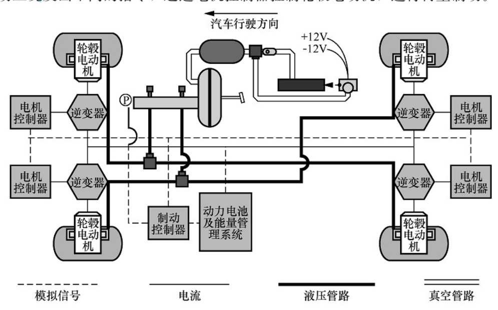


图4.24 纯电动汽车制动能量回收系统的结构原理

制动能量回收的实现过程如下。

（1）在制动开始时，能量管理系统将动力电池的 SOC 值发给制动控制器。当 SOC＞80％时，取消能量回收；当 70％≤SOC≤80％时，制动能量回收受电池允许的最大充电电流制约；当 SOC＜70％时，制动能量回收不受电池允许的最大充电电流制约。

（2）制动控制器接收由压力变送器传送的主缸压力信号，并计算出需求的电机再生制动强度上限。

（3）制动控制器根据电动机转速，计算电动机实际能够提供的制动强度。

（4）比较需求的电机再生制动强度上限和电动机实际能够提供的制动强度，并将结果作为电信号发送给电机控制器。

（5）此时的电动机工作在发电机状态下，可以提供电压恒定流向的电流，再通过逆变器限制电动机产生的最高电压并对电压进行升压，以便满足电流输出要求，充到动力电池组中。

（6）为了保护电池，能量管理系统需要时刻监测电池温度，温度过高则停止制动能量回收。

4.6.3 纯电动汽车制动能量回收控制策略

1. 常见的制动能量回收控制策略

常见的纯电动汽车主要采取前轮驱动的形式，因此相应的制动能量回收的控制策略主要关注前、后轮制动器提供的制动力和前轮电动机提供的再生制动力三部分之间的关系。由此得到的基于电机再生制动的能量回收控制策略主要有以下三种：前后轴制动力理想分配时的控制策略、前后轴制动力比例分配时的控制策略和最优能量回收控制策略。

（1）前后轴制动力理想分配时的控制策略。当减速度要求较小时，仅电机再生制动系统工作。随着制动减速度逐渐增大，前后轴制动力将被控制在理想制动力分配曲线上。其中前轴制动力等于再生制动力和机械制动力的总和。当控制系统得到驾驶人的减速度要求时，将根据制动电动机的特性和车载能量存储系统的 SOC 值来决定驱动轴制动力是由电机再生制动系统单独提供，还是由机械制动系统和再生制动系统共同提供。

（2）前后轴制动力比例分配时的控制策略。当需要的总制动力较小时，全部由电机再生制动系统提供；当需要的制动减速度增大时，再生制动力所占的比例逐渐减小；机械制动系统开始起作用；当总制动力大于一定值时意味着这是一个紧急制动，再生制动力减小到零，机械制动系统提供所有的制动力；当需要的制动减速度在两者之间时，再生制动系统与机械制动系统共同作用。

（3）最优能量回收控制策略。当总制动力需求小于此时能提供的最大再生制动力时，仅由电机再生制动系统起作用；当总制动力大于此时能提供的最大再生制动力时，总制动力减去最大再生制动力是应该提供的机械制动力，剩余的需提供的机械制动力将分配为前轮机械制动力和后轮机械制动力。前、后轮机械制动力的分配应尽量使总的前、后轮制动力接近理想制动力曲线。

三种制动控制策略的比较见表 4－4。

表 4-4 三种制动控制策略的比较

控制策略	硬件组成的复杂程度	制动稳定性	制动能量回收效率
前后轴制动力理想分配时的控制策略	较复杂，需专门的制动力控制系统	较高	较高
前后轴制动力比例分配时的控制策略	一般，改动较小	中等	中等
最优能量回收控制策略	较复杂，需专门的制动力控制系统	较低	最高

可以看出，三种回收策略各有优缺点，其中，前后轴制动力比例分配时的控制策略不但能保证一定的能量回收效率，制动稳定性较理想，而且结构较简单，是目前技术条件下比较好的选择。

2. 四轮驱动下的制动能量回收控制策略

在已经进行的制动能量回收研究中，纯电动汽车大多是采用单电动机前轮驱动的，制动能量回收只集中在电动机所驱动的前轮上。当纯电动汽车采用四轮驱动的形式时，前后车轮都是由轮毂电动机直接驱动的，所以制动能量回收在前轮和后轮同时存在。

基于上述分析，四轮驱动下的制动能量回收控制策略主要考虑三部分的内容：一是摩擦制动力与电机再生制动力的分配关系；二是前后轴摩擦制动力的分配关系；三是前后轴电机再生制动力的分配关系。

结合对已存在的制动能量回收控制策略的分析，提出一种对前后轴制动力比例分配时的控制策略进行修改后的控制策略，这种策略同时包含前后轮的再生制动。所建立的四轮驱动下的制动能量回收控制策略逻辑如图 4.25 所示。

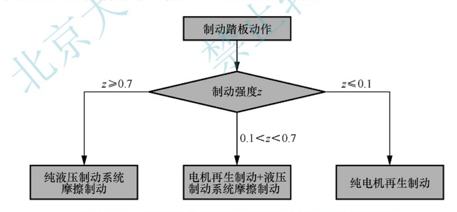


图 4.25 四轮驱动下的制动能量回收控制策略逻辑

控制逻辑中主要根据由液压制动压力所反映的制动强度进行逻辑控制。当需求的制动强度 $z \leqslant 0.1$ 时，仅由电机再生制动系统提供整车制动所需的力；随着需求的制动强度的增加，液压制动系统逐渐开始起作用，再生制动力所占比例逐渐减小，即 $0.1 < z < 0.7$ 时，整车的制动力摩擦制动力与再生制动力共同组成；当需求的制动强度 $z \geqslant 0.7$ 时，此时认为汽车进行紧急制动，为了保证制动安全性，制动力完全由液压制动系统提供。

基于上面的控制逻辑所建立的整车制动能量回收控制策略如图 4.26 所示。

图 4.26 中，*OAB* 曲线所示为纯液压系统摩擦制动时前后轴制动力的分配曲线；*OACBD* 为再生-液压制动系统的前后轴制动力的分配曲线，前后轴的摩擦制动力分配是

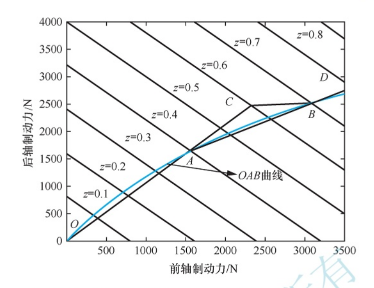


图 4.26 四轮驱动下的整车制动能量回收控制策略

按照一定的比例进行的。

再生-液压制动系统中，总再生制动强度与整车制动强度的关系如图 4.27 所示。总再生制动强度是指总的再生制动力与整车重量的比值。由于四个轮毂电动机是完全相同的，可以认为它们的再生制动工况是相同的，即四个轮毂电动机平均分配整车的再生制动力。

结合前面对所研究制动控制策略三个方面的讨论，建立相应的控制算法，如图 4.28 所示。控制算法的总输入量为总制动力，由制动踏板力传感器得到。总再生制动力及前后轴再生制动力由制动控制器中的再生制动力曲线得到，前后轮摩擦制动力分配由制动回路中的高速开关阀实现。控制算法的输出量为前轮再生制动力、后轮再生制动力、前轮摩擦制动力和后轮摩擦制动力。所有的再生制动力由电机控制器进行控制。

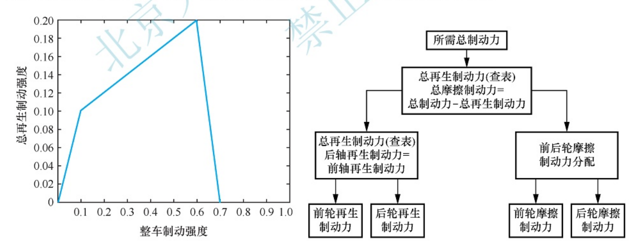


图 4.27 总再生制动强度与整车制动强度的关系

图 4.28 四轮驱动汽车再生制动能量回收控制算法

4.6.4 纯电动汽车制动能量回收系统仿真

在 ADVISOR 中建立某四轮驱动纯电动汽车制动能量回收系统的仿真模型，选择比较符合中国公路行驶工况的 10－15 工况和典型的停车制动工况进行仿真，通过仿真结果考察制动过程中制动力的分配、能量回收效率和电池的充电电流等，对所建立的四轮轮毂电动机驱动下的制动控制策略进行评价。

1.10－15 循环工况仿真分析

纯电动汽车设计为行驶在市区内的代步电动车。行驶时，车速较低，起步、停车频繁。为考察在市区行驶时纯电动汽车的制动能量回收系统的效果，选择比较符合我国汽车行驶的 10－15 循环工况进行仿真实验。10－15 循环工况中，汽车运行速度如图 4.29 所示。10－15 循环工况总运行时间为 660s，平均车速为 22.68km/h，最高车速为 70km/h，行驶过程中共停车 7 次。10－15 循环工况下，汽车行驶速度变化较小，平均速度较低，制动平缓，符合城市循环过程仿真。

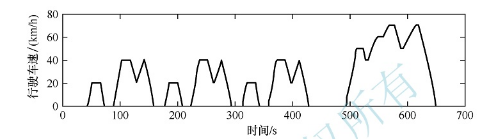


图 4.29　10－15 循环工况中汽车运行速度

10－15 循环工况前后轮再生制动力如图 4.30 所示。制动时，前后轮获得的再生制动力是相等的。这与所制定的制动能量回收策略有关。车轮上再生制动力的大小还与循环中汽车速度变化的快慢有关。当车速变化较大时，整车的制动强度增大，从而轮毂电动机的再生制动强度也增大，再生制动力相应增大。

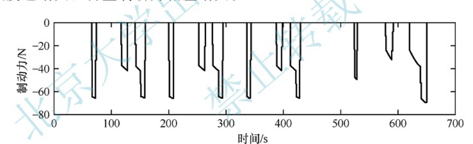


图 4.30　10－15 循环工况前后轮再生制动力

10－15 循环工况前后轮再生制动力矩如图 4.31 所示。前后轮的再生制动力矩是相同的。10－15 循环工况下，整车的制动强度较小，前、后轮所负责的再生制动力相等，故再生制动转矩也是相等的。

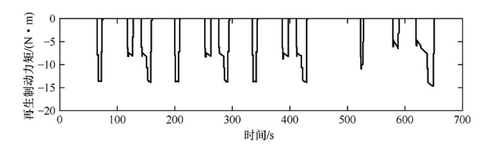


图 4.31　10－15 循环工况前后轮再生制动力矩

10－15 循环工况电池的 SOC 值如图 4.32 所示。纯电动汽车采用全电驱动，在行驶过程中，电池向电动机提供能量，SOC 值逐渐减小。在再生制动作用下，电动机向电池充

电，电池的 SOC 值会有一定程度的升高，再生制动力矩越大，再生制动持续的时间越长，SOC 值升高得越多。

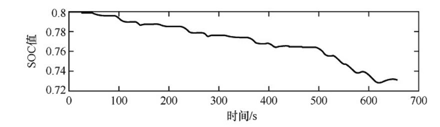


图 4.32 10－15 循环工况电池的 SOC 值

在再生制动过程中，电动机因其电动机/发电机的可逆性，可以作为发电机将汽车的动能转化为电能，并储存在电池中，此时电池显示负电流，表示向电池充电，如图 4.33 所示，此时的充电电流是四个电动机所产生的电流的总和。充电电流的大小与再生制动力矩和再生制动时间有关。

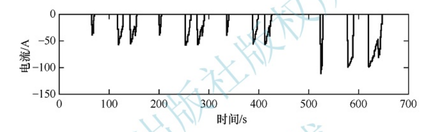


图 4.33 10－15 循环工况电池的充电电流

10－15 循环工况制动能量回收曲线如图 4.34 所示。当电动机进行再生制动时，电动机向动力电池充电，电池默认为负能量。电动机回收制动能量的数量与再生制动的强度及再生制动持续的时间有关，强度越大，时间越长，所回收的能量也越多。除此之外，汽车的行驶车速及电池的 SOC 值也都是影响能量回收的因素。

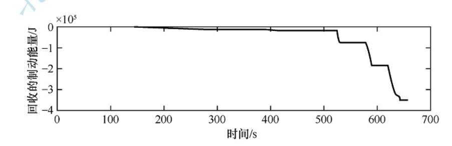


图 4.34 10－15 循环工况制动能量回收曲线

仿真结果表明：在一个 10－15 循环工况中，回收的制动能量为 3.56×10^5J，总的制动能量为 7.28×10^5J，整车消耗的总能量为 1.58×10^6J，制动能量的回收效率为 48.9%，总能量的回收效率为 22.5%。采用四轮轮毂电动机驱动时，总能量的回收效率高于 20%，比前轮驱动下的总能量回收效率高。

2. 停车制动工况仿真分析

汽车从行驶到完全制动停止的过程中，汽车的动能通过摩擦制动而转化为热能逐步耗散在空气中。纯电动汽车使用的是再生-液压制动系统，制动过程中有一部分的制动动能

可以通过电动机转化为电能储存在电池中。

动能向电动机传输的过程中，有一部分消耗在机械摩擦过程中；电动机向电池充电的过程中，还要受到电池的充电电流、充电功率及电池的SOC值等的限制。所以，只是一部分制动动能可以传递到电池中。

常见的制动停车可以分为紧急制动停车和缓速制动停车两种。紧急制动停车是在紧急状况下，为了使汽车在较短的时间内停止而采取的制动方式，需求的制动力大，制动时间短，制动强度较大。缓速制动停车是指汽车逐步减慢车速，必要时通过制动使汽车速度逐步减小直至汽车完全停止的过程，这一过程一般时间较长，制动平缓，制动强度小，是常见的停车方式。

设置停车制动的初始速度为48km/h，完全制动停车的时间分别为2s和10s。通过仿真分析可以得到，2s制动停车的能量回收效率为6.2%，10s制动停车的能量回收效率为25.1%。10s制动停车工况下汽车回收制动能量的能力远远高于2s制动停车工况，这与再生制动强度、再生制动持续的时间有关。对比两种制动停车工况，2s制动停车工况下，整车的制动以摩擦制动为主，再生制动为辅，再生制动持续时间较短，能量回收效果一般；10s制动停车工况下，整车制动以再生制动为主，摩擦制动为辅，再生制动持续时间较长，能量回收效果较好。



1. 纯电动汽车由哪几部分组成?
2. 纯电动汽车有哪些布置形式？各有什么特点?
3. 在纯电动汽车设计中，如何确定电动机参数、传动系统传动比和电池组容量?
4. 如何求纯电动汽车的动力性评价指标?
5. 纯电动汽车经济性评价指标是什么?
6. 如何计算纯电动汽车的经济性?
7. 影响纯电动汽车续驶里程的主要因素有哪些?
8. 纯电动汽车中的电池管理系统具有哪些功能?

第 5 章　增程式电动汽车

增程式电动汽车是以动力电池为主动力源，发动机为辅助动力源的一种新型电动汽车。在日常行驶时，增程式电动汽车类似于纯电动汽车，发动机完全关闭，处于纯电动模式，该模式完全可以满足城市日常上下班行驶需求。而在动力电池荷电状态达到较低水平时，发动机起动作为主动力源，补充汽车行驶所需的电能，多余的电能对动力电池进行充电。



【增程式电动汽车】

5.1　概　　述

5.1.1　增程式电动汽车的结构

图 5.1 所示为一款增程式电动汽车的动力传动系统结构。

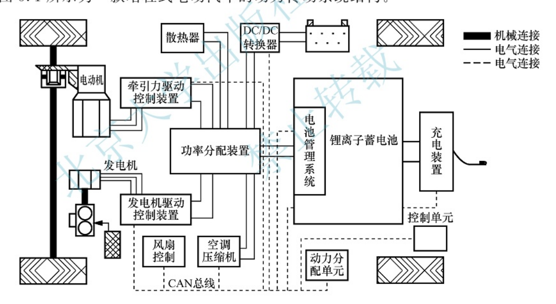


图 5.1　一款增程式电动汽车的动力传动系统结构

增程式电动汽车动力传动系统由电驱动系统、发动机/发电机系统、功率分配装置、动力电池等组成。

电驱动系统是由电动机及牵引力驱动控制装置组成的。发动机到电动机之间没有机械连接，而是先通过发电装置，将燃油的化学能转化为电能（三相交流电），然后发电机驱动控制器将交流电转化为直流电，并通过发电机驱动控制装置到达功率分配装置，根据工况需要做出牵引力驱动控制的功率分配。发动机作为主要动力源时的动力传输如下。①在需求功率比较大时，功率分配装置会直接将电能传递给牵引力驱动控制装置，驱动汽车行驶，不经过电池管理系统。根据汽车功率需求，牵引力驱动控制装置中的逆变器将直流电转化为三相交流电，驱动电动机运转。②在增程模式下，如果增程模块提供的电能有剩

余，则多余的电能将为电池充电，电池在增程模式下起到平衡系统充电和放电的作用，稳定系统电压。③停车时，可以通过外接充电装置为蓄电池充电。此外，动力系统提供的电能要满足附件(如散热器、风扇、空调压缩机等)功率的需求。

各个系统之间的数据传输可由 CAN 总线完成，实现控制单元之间的信息传递和命令执行。具体数据传输如下：根据驾驶人传递给加速踏板或者制动踏板的位置指令，获取需求功率信息，传递给主控制器，主控制器根据目前行驶状况和汽车的状态进行判断，确定当前增程式电动汽车的运行模式，将控制指令传给部件控制器，如牵引力驱动控制装置、电池管理系统、发动机驱动控制器、附件功率控制器等。

发动机、发电机和发电机驱动控制装置共同组成了增程系统。增程器是增程式电动汽车驱动系统的关键组件，发动机/发电机系统与驱动车轮在机械上是分离的，发动机的转速和转矩与车速和牵引转矩的需求无关，因此可控制发动机运行在其转速-转矩平面上的任意点。通常应控制发动机使其运行在最佳工况区，此时发动机的油耗和排放降到最低程度。由于发动机和驱动车轮没有机械连接，因此最佳的发动机运行状态是可以实现的，其与电驱动系统的运行模式和控制策略密切相关。

增程器只提供电能，电能用来驱动电动机或者为动力电池充电，增加汽车的行驶里程；发动机到电动机之间的动力传递路线没有机械连接，可以将电能用于驱动汽车，不经过电池的充放电过程，降低了从增程系统到动力电池的能量传递损失。增程式电动汽车控制策略的目的是在动力电池电能充足的情况下，保持在纯电动工作模式，将有害物质排放降到最低。这种模式下的控制策略与纯电动汽车类似，增程模式下的控制策略要保证增程器和动力电池得到最佳的匹配，获得最优的整车系统效率。

5.1.2 增程器的分类

增程器是增程式电动汽车最重要的组件之一，与汽车的性能、油耗、燃油替代、原始成本和运行成本密切相关。增程器可以进行如下分类。

1. 按安装位置分类

增程器包括发电装置和辅助能量储存装置。根据增程器与汽车的安装关系，即增程器的安装位置，可以将增程器分为挂车式、插拔式和车载式三种。

(1) **挂车式增程器**。挂车式增程器安装在拖车上，根据行驶距离的不同来决定是否使用增程器，出行前需要对出行距离做出预估，长距离行驶时需要拖挂增程器以适时提供能量；市区短途行驶时取下拖车，此时完全变为一辆纯电动汽车使用。这种形式的增程器由于结构的特殊性，实用性不高，更多的是应用于室内场馆车。挂车式增程器的优点是增程器输出功率能够根据需要设计，而且可以使用多种辅助燃料。其缺点是缺乏使用的灵活性，拖车质量和体积都比较大，不易倒车；在不确定是否需要长距离行驶时，或者有突发性事件时，都为驾乘者造成了很大的不便，限制了随意驾驶的自由度。

(2) **插拔式增程器**。插拔式增程器将增程器设置为可插拔的模块，是考虑到短途行驶时不需要携带增程器行驶而提出的方案。这种增程器需要将增程器系统模块，包括控制器和 DC/DC 转换器集中在一起，做成一个方便拆卸的独立单元。在日常短途行驶时，将增程器系统整体从车上拆下，此时只用动力电池的电能驱动汽车行驶，完全变为纯电动汽车，减少了汽车的整备质量，提高了能量利用率；长途行驶时，将增

程器模块通过机械及电气接口与整车动力系统相连，增加续驶里程。这种形式的增程器对设计要求较高，并需要与动力部件及传动系统的合理匹配，在匹配的基础上要求的控制策略非常复杂，还要解决振动噪声等附加问题，所以采用这种增程器的增程式电动汽车价格偏高。

（3）**车载式增程器**。车载式增程器与纯电动汽车的动力系统固定在一起，结构形式简单，动力系统可以方便地实现结构布置，提高了整车的空间利用率，与插拔式增程器相比，不需要在出行前对出行距离进行预估，也不需要频繁地对增程器进行拆卸和安装，是目前应用最多的增程器。

2. 按结构组成分类

按照增程器的结构组成，可以将增程器分为以下几种。

（1）**大容量蓄电池增程器**。大容量蓄电池增程器的优点是便于统一标准和规格，研发周期短，成本低，容易实现量产。但是由于这种增程器基于传统的蓄电池，因此不可避免地存在能量密度较低、体积偏大、成本高等缺点；短距离行驶时的优势明显不足。

（2）**燃料电池增程器**。为了达到尽量避免使用燃油、实现零排放的目标，燃料电池增程器成为一种新的选择。可以采用功率为5～10kW的小型燃料电池作为增程器，与车载主动力电池协同工作，延长汽车的续驶里程。

以用氢燃料电池的增程器为例，燃料电池增程器的动力结构如图5.2所示。燃料电池增程器分为电源及其管理系统、氢气系统、燃料电池及其控制系统三个子模块。其中电源及其管理系统子模块主要由压力传感器、电压传感器、电流传感器、DC/DC转换器、继电器、控制器铝盒、控制器插接件集合而成。氢气系统子模块主要由氢瓶、氢传感器、氢气管路、减压阀集成。燃料电池及其控制系统子模块由电堆、电堆控制器、电池阀、单片检测接头、电堆输出端导线、燃料电池风扇DC/DC转换器组成，可以很方便地实现拆装。采用模块化布置法的氢燃料电池增程器系统整体结构如图5.3所示。

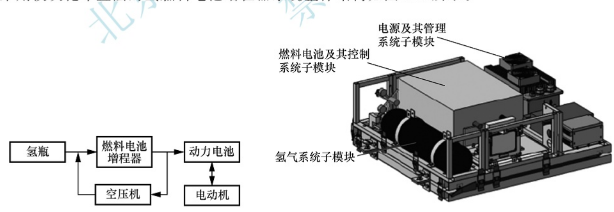


图5.2 燃料电池增程器的动力结构　　图5.3 采用模块化布置法的氢燃料电池增程器系统整体结构

目前燃料电池增程器处于开发阶段，从整车集成方面的要求来讲，要求空气压缩机体积小、质量轻，并需要良好的散热装置；从燃料电池的工作压力来讲，要求压缩机的空气压缩比较大，同时保证输出的空气流量相对较小，所以要使燃料电池增程器能够成熟地运用于增程式电动汽车，需要克服以上技术问题。目前燃料电池增程器在增程式电动汽车上的应用还处于研发阶段。

（3）**发动机/发电机组增程器**。发动机/发电机组增程器可以采用多种发动机与发电机

进行组合成为增程系统，可供选择的发动机有传统的活塞式发动机、转子发动机、小型燃气轮机等。由于这种增程器的电能由发动机提供，经历了发动机/发电机的能量转换过程，因此发电机功率要大于增程系统功率，发动机到发电机之间存在能量损失，要求发动机功率大于发电机功率，在满足以上结构和配置的基础上，保证发动机和发电机都工作在转矩、转速高效率区。发动机/发电机组增程器是目前应用最多和技术最成熟的增程器。

5.1.3 增程式电动汽车的原理

增程式电动汽车的动力系统在组成上与串联插电式混合动力汽车的动力系统相似，特殊之处在于增程式电动汽车的能量传递路线体现出两种动力系统一种驱动方式，即电动机驱动。在结构上，增程式电动汽车是在纯电动汽车的基础上开发的电动汽车，增程器的布置对原有汽车的动力系统结构影响较小。之所以称之为增程式电动汽车是因为汽车追加了增程器，而为汽车追加增程器的目的是进一步提升纯电动汽车的续驶里程，使其能够尽量避免频繁地停车充电。

第一种工作模式为纯电动模式，能量传递路线如图5.4所示。与发动机和发电机无关，电池是唯一的动力源。这种工作模式与纯电动汽车一样，相当于一辆纯电动汽车。不同之处是，增程式电动汽车的纯电动行驶里程可以设置的相对较小，不必装备大量的电池组，电池的，电量能够满足汽车起步、加速、爬坡、怠速，以及驱动汽车空调等附件。

第二种工作模式为增程模式，能量传递路线如图5.5所示。在电池的荷电状态达到预设的最低SOC值时，增程器系统启动，发动机运行在最佳的状况，发电机发电，一部分用于驱动汽车行驶，多余的电量为电池充电。增程模式的发动机可以有多种工作方式，根据控制策略的不同，可以选择发动机恒功率模式、功率跟随模式、恒功率与功率跟随结合模式，此外有智能控制策略和优化算法控制策略等复杂控制策略模式。当汽车停止时，可以利用市电为电池充电。

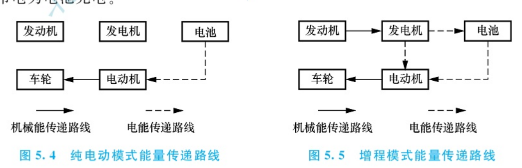


图5.4 纯电动模式能量传递路线　　图5.5 增程模式能量传递路线

5.1.4 增程式电动汽车的特点

增程式电动汽车与普通燃油驱动汽车相比，短距离行驶时不起动发动机，不排放污染物，长距离行驶时油耗比较低，在大部分情况下发动机不起动，所以噪声小。而且增程式电动汽车发动机/发电机起动时，工作于最佳工作范围内，这大大提高了发动机的工作效率。

增程式电动汽车与纯电动汽车相比，其最大的优点是行驶里程得到了很大提高。纯电动汽车由于完全使用价格高昂的动力电池，附加成本高，而且即使采用最新的电池技术，

行驶里程仍然有限；一旦电池能量消耗尽，汽车就无法行驶，只能停车等待充电。增程式电动汽车使这个问题得到了很好的解决。增程式电动汽车可以随时在加油站加油；在相同行驶里程条件下增程式电动汽车的电池组比较小，电池容量只需要纯电动汽车的30%～40%，无需配备大容量的动力电池，制造成本大幅降低；当电池组SOC值降低到一定限值时，转为增程模式运行，避免了电池组的过放电，电池寿命得到延长；不需要周转电池，可在停车场进行市电充电，不需要建立充电站，不需要大量的换电设施和工作人员，降低了成本。

增程式电动汽车与插电式混合动力汽车的最大区别在于，由于动力电池容量的增大及驱动系统设计的不同，增程式电动汽车在电能充足条件下行驶时发动机不参与工作。因此，增程式电动汽车并不需要像插电式混合动力汽车那样对工作模式进行特定的说明。增程式电动汽车所使用的动力电池、驱动电动机及动力系统的用电功率都必须以满足整车性能要求为目的而设计，汽车所搭载的动力电池及其容量也必须从能够满足纯电动汽车整车性能需要的角度考虑。增程式电动汽车的工作模式看上去与早期的纯电动型插电式混合动力汽车相似，然而在电池电量充足的情况下，增程式电动汽车必须在所有的工作模式下维持纯电驱动模式。增程式电动汽车不需要为了驾驶者速度和功率的需求而起动发动机，因此在电池电量充足的情况下不需要像早期的纯电动型插电式混合动力汽车那样转变为混合驱动模式运行。在增程器设计方面，增程式电动汽车允许将发动机的功率显著降低，发动机所提供的动力不需要达到汽车动力性能所需的峰值功率，仅满足汽车行驶所需要的持续动力需求即可。

增程式电动汽车与混合动力汽车相比，由于混合动力汽车采用了复杂的机械动力混合结构，发动机和电动机复合驱动，电池能量很小，只起到辅助驱动和制动能量回收的作用。增程式电动汽车采取电池扩容的方式解决了电池驱动的续行能力问题，虽然汽车成本略有提高，但是在正常的运行工况下，有了电能补充装置的作用，电池处于良性平台充放电，保证了电池的使用寿命，减少了维护成本；而电能补充装置使电量补充一直处于最佳工作状态，保证了发动机最佳工作状态。而且增程式电动汽车能外接充电，尽可能利用晚间低谷电或午间驾乘人员的休整间隙充电，进一步提高了能源利用率。

增程式电动汽车与燃料电池电动汽车相比，其电池成本更低，技术也更成熟，燃料电池转换效率高，对环境无污染，随着燃料电池技术的进步和配套设施的成熟，开发和使用成本也会相应降低。

增程式电动汽车能够有效节约燃油利用率，主要原因如下。①发动机不是直接与机械系统相连，发动机的工作状态相对独立，可将发动机设定于最佳效率点工作。②在电量保持模式下，主要由发动机驱动整车行驶。当需求功率较小时，发动机关闭，由动力电池驱动整车行驶；当需求功率较大时，动力电池提供发动机功率不足的部分，这样可避免发动机的工作点波动，保证发动机工作于最佳效率点。③当汽车制动时，电池组能有效回收制动能量。

综上所述，增程式电动汽车是一种可增加续驶里程的纯电动汽车，兼有混合动力汽车和纯电动汽车的特征，是现阶段解决新能源汽车技术问题最切实可行的方案之一。增程式电动汽车的特点如下。

(1) 在电量消耗模式下，发动机不起动，由动力电池驱动整车行驶，这样可减少整车

对石油的依赖，缓解石油危机。

(2) 在电池电量不足时，为了保证汽车性能和电池组的安全性，进入电量保持模式，由动力电池和发动机联合驱动整车行驶。

(3) 整车纯电动续驶里程满足大部分人员每天行驶里程要求，可利用晚间低谷电为动力电池充电，缓解供电压力。

(4) 整车大部分情况下在电量消耗模式下行驶，能达到零排放和低噪声的效果。

(5) 发动机与机械系统不直接相连，发动机可工作于最佳效率点，大大提高了整车燃油效率。

鉴于增程器工作条件的特殊性，对电动汽车的增程系统提出了以下的要求。

(1) 增程系统要稳定可靠，可以立刻启动并进入正常工作状态。当长时间不用时要定期开启发动机运转，以使各个部件得到良好的润滑和维护。

(2) 由于工况复杂，为了实现高效率和低排放的要求，要求系统处在最优工作点工作，因此控制器非常关键，通过控制策略和优化措施，在保证整车动力性前提下提高经济性和效率。

5.2 增程式电动汽车动力传动系统的参数匹配

增程式电动汽车参数匹配的原则是根据整车动力总成的结构特点和整车设计指标(动力性、经济性、续驶里程等)，对整车动力总成的参数进行匹配。这里主要对驱动电动机的参数、动力电池的参数和增程器的参数进行匹配。

5.2.1 驱动电动机的参数匹配

增程式电动汽车对电力驱动系统的要求更加严格，因此选取的驱动电动机应该具备更高的功率密度，而且在较宽的转速和转矩范围具备更好的效率特性，同时驱动电动机控制器能实现双向控制，以实现制动能量回收。

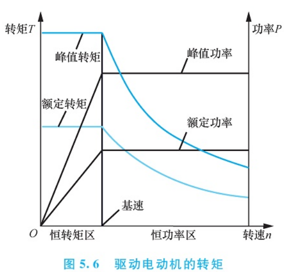


图 5.6 驱动电动机的转矩(功率)-转速特性曲线

驱动电动机是增程式电动汽车行驶的动力源。增程式电动汽车要求驱动电动机在爬坡或低速行驶时提供较大的转矩，在加速时提供较大的功率，同时需要比较大的调速范围。其中电动机峰值转矩应满足整车爬坡度需求，在减速比、车轮半径等参数固定的情况下，电动机转矩决定爬坡性能。

驱动电动机的转矩(功率)-转速特性曲线如图 5.6 所示。

需要确定的特性参数主要包括驱动电动机的最高转速和额定转速、峰值功率和额定功率(即功率匹配)等。

1. 最高转速和额定转速

电动汽车最高车速与驱动电动机最高转速之间的关系为

$$n_{max} = \frac{u_{max} i_0}{0.377r} \tag{5-1}$$

式中，n_{max} 为驱动电动机的最高转速(r/min)；u_{max} 为电动汽车的最高车速(km/h)；i_0 为主减速器传动比；r 为车轮半径(m)。

驱动电动机的最高转速与额定转速之比称为扩大恒功率区系数，一般用β来表示。β值越大，转速越低，转矩增高，有利于提高汽车的加速和爬坡性能，稳定运行性能越好，但同时功率变换器尺寸也会增大，因此β值不宜过高，通常取为2～4。

2. 功率匹配

驱动电动机的功率直接影响整车的动力性，电动机功率越大，整车运行时的后备功率越大，加速及爬坡能力越强，但同时也会增加电动机本身的体积和质量，进而影响整车的质量。驱动电动机的额定功率一般由最高车速确定，峰值功率由整车的设计目标来确定。峰值功率应该达到最高车速、爬坡性能及加速时间分别对应的最大功率需求。

(1) **根据最高车速确定驱动电动机功率**。最高车速对应的驱动电动机功率需求为平坦路面满载运行时所需的驱动电动机功率，其表达式为

$$P_{m1} = \frac{u_{max}}{3600\eta_t}\left(mgf + \frac{C_D A u_{max}^2}{21.15}\right) \tag{5-2}$$

式中，P_{m1} 为最高车速所需的驱动电动机功率；m 为汽车质量；η_t 为传动系统效率；f 为滚动阻力系数；C_D 为风阻系数；A 为迎风面积。

(2) **根据最大爬坡度确定驱动电动机功率**。最大爬坡度所需的驱动电动机功率的表达式为

$$P_{m2} = \frac{u_p}{3600\eta_t}\left(mgf\cos\alpha_{max} + mg\sin\alpha_{max} + \frac{C_D A u_p^2}{21.15}\right) \tag{5-3}$$

式中，P_{m2} 为最大爬坡度所需的驱动电动机功率；α_{max} 为最大爬坡角；u_p 为爬坡时的车速，可以取 30km/h。

(3) **根据加速时间确定驱动电动机功率**。加速时间所需的驱动电动机功率完全由汽车的加速性能、电动机特性和传输特性来确定。

$$P_{m3} = \frac{1}{1000\eta_t}\left[\frac{2}{3}mgfu_f + \frac{1}{5}\rho_a C_D A u_f^3 + \frac{\delta m}{2t_a}(u_f^2 + u_b^2)\right] \tag{5-4}$$

式中，P_{m3} 为加速时间所需的驱动电动机功率；δ 为旋转质量转换系数；u_f 为加速结束后的最终车速；u_b 为驱动电动机额定转速对应的车速；t_a 为预期的加速时间。

式(5-4)中括号内的第一、二项分别代表克服轮胎的滚动阻力和空气阻力的平均功率，第三项功率代表用来加速汽车质量的能力。

综合考虑动力性各项指标，驱动电动机的额定功率和峰值功率为

$$P_e \geqslant P_{m1}$$

$$P_{e\max} \geqslant \max[P_{m1} \quad P_{m2} \quad P_{m3}]$$

驱动电动机的峰值功率与额定功率的关系为

$$P_{e\max} = \lambda P_e \tag{5-5}$$

式中，$P_{e\max}$ 为驱动电动机的峰值功率；P_e 为驱动电动机的额定功率；λ 为驱动电动机的过载系数。

驱动电动机的额定转矩和峰值转矩为

$$T_e = \frac{P_e \times 9550}{n_e} \tag{5-6}$$

$$T_{e\max} = \frac{P_{e\max} \times 9550}{n_e} \tag{5-7}$$

式中，$T_{e\max}$ 为驱动电动机的峰值转矩；T_e 为驱动电动机的额定转矩；n_e 为驱动电动机的额定转速。

驱动电动机参数初步确定之后，还须验证是否满足一定车速下的最大爬坡度和汽车行驶最高车速的要求，即

$$\frac{mg}{T_{e\max}\eta_t}\left(f\cos\alpha_{\max} + \sin\alpha_{\max} + \frac{C_D A u_p^2}{21.15mg}\right) \leqslant \frac{i_0}{r} \leqslant \frac{0.377n_{\max}}{u_{\max}} \tag{5-8}$$

5.2.2 动力电池的参数匹配

电动汽车用动力电池是整车的主要能量源。动力电池的参数匹配包括电池类型的选择、电池组电压、单体电池的个数和能量的匹配。增程式电动汽车由于其增程系统的特殊性，要求电池的电压等级要与驱动电动机电压等级相一致，并且符合驱动电动机电压变化的要求。

1. 能量需求

能量方面，要求电池在现有技术条件下，具有较高的比能量和比功率、充放电循环寿命，以及良好的安全性和稳定性。

电池能量为

$$E_B = \frac{U_m C_E}{1000} \tag{5-9}$$

式中，E_B 为电池能量(kW·h)；U_m 为电池端电压(V)；C_E 为满足能量需求的电池容量(A·h)。

电池能量应满足以下条件。

$$E_B \geqslant \frac{mgf + C_D A u_a^2/21.15}{3600 \times \mathrm{DOD}\eta_t\eta_{mc}\eta_{dis}(1-\eta_a)} \times S_1 \tag{5-10}$$

式中，DOD 为电池放电深度；η_{mc} 为驱动电动机效率；η_{dis} 为电池放电效率；η_a 为汽车附件能量消耗比例系数；S_1 为纯电动行驶里程(km)。

或者电池容量满足以下条件。

$$C_E \geqslant \frac{mgf + C_D A u_a^2/21.15}{3.6 \times \mathrm{DOD}\eta_t\eta_{mc}\eta_{dis}(1-\eta_a)U_m} \times S_1 \tag{5-11}$$

2. 功率要求

电池最大放电功率需满足

$$P_{bat_max} \geqslant \frac{P_{\max}}{\eta_{mc}} + P_A \tag{5-12}$$

式中，P_{bat_max} 为电池最大放电功率(kW)；P_A 为汽车附件功率。

或者满足容量要求，即

$$C_P \geqslant \frac{1000}{kU_m}\left(\frac{P_{bat_max}}{\eta_{mc}}+P_A\right) \tag{5-13}$$

式中，C_P 为满足功率需求的电池容量（A·h)；k 为电池最大放电率。

电池容量取值规则为

$$C=\min_{k^*=\min(k)}\{\max[C_P(k)\quad C_E(k)]\} \tag{5-14}$$

式中，k^* 为电池最大放电率。

5.2.3 增程器的参数匹配

增程器采用车载式，与纯电动汽车的动力系统固定在一起，这样的系统结构形式简单，系统作用是为驱动电动机提供冗余功率，在电池 SOC 值低于设定值时或电池出现故障时，应能保证汽车以平均行驶车速匀速行驶。在增程模式下，发动机提供源动力，要求具有相当的动力性，故需要匹配发动机/发电机的参数。

发动机功率的选择对增程式电动汽车动力系统的设计至关重要。发动机选型设计中常按照汽车的最高车速来初步选择发动机功率(这是因为汽车的加速性能和爬坡性能可以由汽车的最高车速来体现)即满足式(5-15)。

$$P_{RE}=\frac{1}{3600\eta_t}\left(mgfu_{max}+\frac{C_DAu_{max}^3}{21.15}\right) \tag{5-15}$$

发动机额定功率的选择应大于上述计算的理论值，以承载连续的非牵引负载，如灯光、娱乐、空调、动力转向装置和制动增压等。

根据所选发动机的燃油消耗 Map 图，可以计算满足增程式电动汽车增程续驶里程所需要的油箱容积为

$$V=\frac{S_2 f_c}{u_a} \tag{5-16}$$

式中，S_2 为增程续驶里程(km)；f_c 为发动机高效工作点处油耗(L/h)。

永磁同步电动机的转子为永磁体，效率高，功率密度大，一般发电机选择永磁同步电动机。

发电机的工作电压应与电池组相匹配，发电机的功率应与发动机功率的选择相协调、匹配。要求所选的发动机在发电机工作转速时具有较低的燃油消耗率和较好的排放性能。

5.2.4 设计实例

增程式电动汽车动力系统的参数设计和系统零部件之间参数的匹配是按照设计初期的目标来完成的。某纯电动汽车整备质量为 1430kg，满载质量为 1700kg，空气阻力系数为 0.29，主减速比为 6.058，滚动阻力系数为 0.015，滚动半径为 0.334m，迎风面积为 1.97m^2，传动系统效率为 0.95。



【增程式电动汽车匹配】

增程式电动汽车的设计目标如下。

(1) 最高车速为 120km/h。

(2) 0～100km/h 的加速时间为 14s。

(3) 最大爬坡度为 30%。

(4) 纯电动行驶里程：城市工况大于60km，90km/h续航里程大于60km。

(5) 总续驶里程不小于300km。

据统计，国内55%的用户的平均日行驶里程不超过42km，将增程式电动汽车的纯电动模式下的行驶里程的设计目标定为60km，则有大于67%的用户日常出行中仅靠纯电动模式就可以满足每天的行驶需求，对于日行驶里程大于60km的用户，也能节省大部分的油耗，仅有超出60km的行驶里程以增程模式行驶。

根据式(5-1)～式(5-14)就可以对增程式电动汽车动力传动系统的参数进行匹配，计算结果如下。

1. 驱动电动机参数

驱动电动机类型选择永磁同步电动机，峰值功率为103kW，额定功率为42kW，最高转速为7000r/min，额定转速为3000r/min，峰值转矩为328N·m，额定转矩为134N·m。

2. 动力电池参数

动力电池类型选择磷酸铁锂电池，单体个数为90，额定电压为288V，容量为63A·h，SOC=30%～100%，最大放电率为5C，最大充电率为3C。

3. 增程器参数

发动机选择直列四缸汽油发动机，功率为43kW，转速为4000r/min，排量为1.3L。

满足增程式电动汽车增程续驶里程所需的油箱容积为14L。

发电机选择永磁同步电动机，标定输出功率为32kW，标定工作转速为4000r/min，额定电压为288V。

5.2.5 动力传动系统的参数优化方法

如果对动力传动系统的参数匹配不满意，可以对其进行优化。这里基于遗传算法选取易于控制且对整车动力性能和经济性能具有显著影响的参数进行优化设计。

对于只有一格主减速比的增程式电动汽车来说，影响整车动力性和经济性的动力传动系统参数主要有发动机功率、驱动电动机功率、电池数量、蓄电池充放电SOC最高值和最低值。

1. 约束条件

为了锁定搜索范围，对动力性中的加速性和爬坡性进行约束处理。一般情况下，若汽车的加速性和爬坡性满足设计要求，其最高车速也能满足设计要求，所以，只对爬坡度和加速度时间进行分析。

汽车爬坡角为

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{F_t - F_f}{mg\sqrt{1+f^2}}\right) - \arctan f \tag{5-17}$$

式中，F_t 为驱动力；F_f 为滚动阻力；f 为滚动阻力系数。

设汽车在水平良好路面上加速行驶，其受到的坡度阻力为零，则有

$$\frac{du}{dt} = \frac{F_t - (F_f + F_w)}{\delta m} \tag{5-18}$$

将式(5－18)两边作积分变换，推导出电动汽车的加速时间为

$$T=\int_{u_0}^{u_a}\frac{\delta m}{F_t-(F_f+F_w)}du \tag{5-19}$$

根据式(5－17)和式(5－18)，得出动力性约束为

$$g_1=-\arcsin\left(\frac{F_t-F_f}{mg\sqrt{1+f^2}}\right)-\arctan f+\arctan i_{max}\leqslant 0 \tag{5-20}$$

$$g_2=\int_0^{100}\frac{\delta m}{F_t-(F_f+F_w)}du-t\leqslant 0 \tag{5-21}$$

式中，t 为电动汽车 0～100km/h 的加速时间(s)。

2. 优化目标

以增程式电动汽车总的耗电百分比和燃油消耗之和为目标函数，两者之和越小，表明汽车续驶里程越大，性能越好。

整车能量损耗为

$$W_{ci}=\frac{1000P_it_i}{\eta} \tag{5-22}$$

$$P_i=\frac{u_i}{3600}\left(mgf+mgi+\frac{C_DA}{21.15}u_i^2+\delta m\frac{du}{dt}\right) \tag{5-23}$$

式中，P_i 为汽车在每个状态消耗的功率；t_i 为汽车在每个状态行驶的时间；η 为汽车总的传动效率；u_i 为汽车在每个状态的行驶速度。

电池储存的总能量为

$$W=C_eU_eN\,\mathrm{DOD} \tag{5-24}$$

式中，C_e 为单体电池的容量；U_e 为单体电池的电压；N 为单体电池数目；DOD 为电池的放电深度。

遗传算法的目标函数为

$$P_{er}=\frac{\sum W_{ci}}{W} \tag{5-25}$$

增程模式行驶时，驱动力由发动机提供，因此，根据万有特性曲线的发动机最优工作曲线，可以计算发动机在一定功率时的最低燃油消耗率，从而计算出该车速对应的瞬时单位时间内的燃油消耗量，即

$$Q_t=\frac{P_eb}{367.1\rho g} \tag{5-26}$$

式中，Q_t 为发动机单位时间内的燃油消耗量(mL/s)；P_e 为发动机功率(kW)；b 为发动机燃油消耗率[g/(kW·h)]；ρ 为燃油的密度(kg/L)。

等效折算成百公里燃油消耗量(L/100km)为

$$Q_s=\frac{P_eb}{1.02u_a\rho g} \tag{5-27}$$

将多目标优化问题，通过加权法简化为单一目标，优化目标为

$$\min f(x)=a_1P_{er}+a_2Q_s \tag{5-28}$$

式中，x 为包含了增程式电动汽车动力传动系统参数的向量；a_1 、a_2 分别为耗电百分比和燃油消耗量的加权系数。

利用 MatLab 遗传算法工具箱，在编程器中编写遗传算法的适应度函数，将编辑好的适应度函数导入图形用户界面，并进行初始值的设置，就可以对设计变量进行优化。

5.3　增程式电动汽车的控制策略

增程式电动汽车各动力部件的参数在满足整车动力性前提下，整个动力传动系统中机械部件和电气部件的协调工作是影响整车经济性的一个关键因素。为使整个动力传动系统中机械部件和电气部件协调工作，以及满足增程式电动汽车在不同工作模式下的切换，制定简洁高效的控制策略是非常重要的。

基于增程式电动汽车的结构，将增程式电动汽车的工作模式分为纯电动工作模式和增程工作模式，两种工作模式的切换采用了基于逻辑门限值的控制策略。增程模式下采用将恒功率和功率跟随控制策略结合起来的控制方法，在不同的工作模式下能分别体现出两种控制方式的优点。将增程模式工作区域划分为六种工作状态，与纯电动模式和制动能量回收工作模式一起构成八种工作模式。

5.3.1　增程式电动汽车的控制策略概述

增程式电动汽车的控制策略是服务于汽车控制器的一种算法，汽车控制器接收来自驾驶人的指令，并采集当前汽车行驶工况信息，以当前汽车状态作为反馈条件，如电池 SOC 值，并根据预设的算法指令，确定发动机/发电机组和电池的能量分配关系，从而通过控制器来决定汽车的运行状态。

基于增程式电动汽车的特殊运行模式，在纯电动模式下仅靠电池的能量驱动汽车行驶，增程模式下先由发动机/发电机组为驱动电动机提供驱动电能，多余的电量为电池充电，因此增程模式下能量管理控制策略的好坏不仅直接影响整车的动力性和经济性，而且对新车型的设计研发具有直接的影响。增程模式下的控制策略主要有以下几种：恒功率控制策略、功率跟随控制策略、恒功率与功率跟随相结合的控制策略、优化算法控制策略和智能控制策略等。下面着重介绍恒功率控制策略、功率跟随控制策略、瞬时优化控制策略、自适应控制策略和模糊控制策略。

1. 恒功率控制策略

恒功率控制策略又称单点控制策略。增程器起动后，发动机在预设的工作点按恒定功率输出，输出功率不随工况的变化而变化。该工作点可以是最佳功率点，也可以是保证动力性前提下的最低油耗点。工作点的选取应兼顾发动机的燃油消耗、功率及转速。该控制策略下发动机的输出功率优先用来驱动汽车行驶，当汽车驱动需求功率较小时，剩余的发动机输出功率将用来为电池充电。此外，为了在电池 SOC 值最低的情况下也能提供足够的电能，满足各种行驶工况的需要，要求发动机能够在较高的转速下工作，发动机恒功率运行的工作过程应持续到使电池组充电的 SOC 值达到最大，之后再关闭增程器或使发动机怠速运行。

恒功率控制策略的优点是发动机可以工作在低油耗区或者高效率区，可以提高整车的燃油经济性；缺点是电池放电电流会随着工况的频繁变化而产生较大波动，使电池经常处

于深度充放电循环状态。因此这种控制模式虽然控制策略简单，但采用这种控制策略，会降低电池的使用寿命。

2. 功率跟随控制策略

功率跟随控制策略分为发动机在三个功率点运行的三点功率跟随控制策略和发动机沿固定曲线段运行的曲线功率跟随控制策略。

三点功率跟随控制策略，即预先选定三个最优工作区域的发动机功率值，可以根据不同的工况环境及驾驶人驾驶意图来确定相应的工作点，这样发动机的工作点增加，与恒功率控制策略相比，有两个优点。第一，大部分的发动机功率可以经过动力传递路线，传给驱动电动机，驱动汽车行驶，降低了能量由化学能—电能—化学能—电能的多级转换，降低了电动机的功率损失，提高了整车的效率；第二，电池的充放电波动小，有效地避免了电池过放电，提高了电池的寿命和使用稳定性。

曲线功率跟随控制策略，即发动机的运行沿着固定曲线变化，可以连续地改变发动机的功率值，一般选择最佳燃油经济性时的发动机功率曲线为目标跟随曲线。该控制策略是由汽车行驶工况决定的，发动机的特性已知，汽车在某一个时刻工况下的需求功率决定了在这一功率下的最低燃油消耗率点的数值。因此当电池的 SOC 值达到最低限值时，发动机/发电机组开启，并沿着最低燃油消耗率曲线运行。这种控制模式下，发动机能够提供给电池充电的功率很少，降低了化学能和电能之间的二级转化，极大地提高了汽车的动力性和燃油经济性。但是采用这种控制策略，发动机的工作区间变大，怠速时发动机的能量利用率低。

3. 瞬时优化控制策略

瞬时优化控制策略多用于混合动力汽车中以消耗燃油为主的动力系统。燃油消耗是电池电能间接消耗燃油与发动机直接消耗燃油之和，在计算时将电池消耗的电能等效为燃油消耗量。此控制策略可以有效地结合燃油消耗和排放，对电能和燃油消耗做出一个准确的评估，但是通过计算过程可以看出这种优化控制策略的计算量大，在计算等效燃油消耗时准确性低，并且系统复杂，成本高。

4. 自适应控制策略

自适应控制策略的目标是将整车的燃油消耗和排放两种不同的量纲进行统一，定义权重系数的大小，来突出降低整车的燃油消耗和降低排放两种控制目标。控制的因子为加速时间，百公里油耗，HC、CO、PM 及 NO_x 化合物，根据汽车的行驶工况环境来确定各因子的权值。

这种控制策略的优点是驾驶人灵活性较好，即驾驶人可以根据环境或者自己的意愿来调整自己的驾驶目标；由于该策略同时将动力性和经济性作为影响因子，综合考虑了发动机、电动机的最佳工作点，因此在这种控制策略下，汽车的综合性能较好。这种控制策略的缺点是没有考虑电动机驱动的影响，所以在应用这种控制策略前，首先要将电动机的电量消耗等效折算为燃油消耗量和排放量。

5. 模糊控制策略

模糊控制策略的工程化较强，以发动机最高效率区域和最低燃油消耗为目标，由模糊

控制器和处理器组成，模糊控制器驱动发动机工作。模糊控制器由模糊化接口、反模糊化接口、模糊推理、知识库四部分组成。

模糊控制策略的优点是不需要建立明确的数学模型，而是通过实验数据来进行分析和处理，将采集到的信号数据做模糊化处理，作为模糊计算的输入数据，根据预设的推理方法和知识规则，得出模糊结论；缺点是要有大量的工程实验数据作为模糊计算的参考依据，此外，基于实验得到的数据处理模糊算法规则非常有限，不同配置的汽车发动机，规则的建立非常困难，处于技术不成熟阶段，不能制定有效的、复杂的、系统的控制策略。

5.3.2 增程式电动汽车的控制策略设计

通过分析得出恒功率模式具有较高的工作效率，而功率跟随模式具有更好的燃油经济性和动力性，因此在不同的汽车运行模式下，分别选择更加适合当前功率的控制策略，两者之间进行切换，会使两种控制策略的优势得以充分发挥。

增程模式下的控制策略是将恒功率控制策略和最佳燃油消耗曲线的功率跟随控制策略结合起来使用，充分利用增程器和电池的相对高效工作区域。当汽车行驶需求功率高于一定值时，采用功率跟随模式控制策略，避免电池的频繁启停和过放电；当汽车行驶需求功率较小时，则根据SOC值划分不同的工作模式。

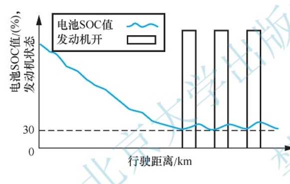


图5.7　增程式电动汽车的总体运行模式

设定SOC门限值作为纯电动模式和增程模式的切换点。当汽车运行在增程模式下时，发动机、电动机为电池充电，使电池SOC值上升，在SOC值未达到最高值时，不会启用纯电动运行模式，而是将多余的电量储存在电池中，直到SOC值达到最高值后，发动机将再次关闭，汽车再次进入纯电动运行模式。增程式电动汽车的总体运行模式如图5.7所示。

1. 增程式电动汽车的控制策略要求

增程式电动汽车主要利用电能作为驱动能源，增加了发动机/发电机组作为增程器，在电池的SOC值达到最低值时，起动增程器，在最佳的状况下工作，多余的电能用来为电池充电，具有低排放甚至零排放的特点；当汽车运行在日常的城市上下班道路时，几乎不需要起动发动机，电能足够满足驾驶者的出行需求。因此，增程式电动汽车的控制策略可以分为两部分：一部分与纯电动汽车一样为纯电动行驶时的控制策略；另一部分是增程模式下的控制策略，此时的控制策略要最大限度地降低能量转换带来的能量损耗，在保证动力性的前提下，达到燃油经济性最佳的目标，提高能量利用率，同时兼顾电池的充放电和循环使用寿命，提高整车的工作效率。

为了使两种能源得到最佳的组合和协调运行，应在保证动力性和驾驶性的基础上，使燃油经济性最佳及排放最低，故应采用合适的能源管理控制策略。在汽车行驶过程中，工况是多变和不可预测的，因此控制策略应能根据不同的路况及汽车的运行需求，适时、合理地分配其能量流并做出合理的反应。对增程式电动汽车控制策略的要求如下。

（1）纯电动模式和增程模式的切换控制要合理，充分利用电池驱动，实现零排放。

（2）防止对电池的过充电和过放电，避免频繁地充放电，延长电池的使用寿命。

（3）在开启增程模式运行后，发动机的起停控制要合理。当发动机为电池充电电量达到一定值时，才关闭发动机/发电机组，继续用电能驱动，这样能量多级转化的损失非常大。但是如果发动机起动后提供给电池的电量比较小，就切换到纯电动模式运行，则需要频繁地起动发动机，必然使发动机的寿命受到影响，也不利于降低排放的设计要求。

（4）发动机长期不用时，要设置电池 SOC 值最低时也能运行的特殊控制模式，以使长期不用的发动机/发电机组得到维护保养。

2. 纯电驱动模式控制策略

增程式电动汽车运行按照电池的状态分为两种模式，一种是电量消耗(Charge Depleting，CD)模式，另一种是电量保持(Charge Sustaining，CS)模式，如图 5.8 所示。最初运行时，电池系统荷电状态处于最高值状态，汽车运行过程中，电池是唯一动力源，驱动电动机的功率也完全是由电池提供的，故该状态为纯电动运行模式。因为电池的 SOC 值不断降低，而发动机/发电机组又完全关闭，故将最大 SOC 值定为 90%，防止过充电对电池造成损害。当电池的 SOC 值降低到最低值时，发动机/发电机组开始工作，此时切换到电量保持模式，此阶段的 SOC 值并不是一个固定的值，而是在某个范围内。

为了有效防止对蓄电池过充电和过放电，应设置电池 SOC 最高值和最低值。

电量消耗模式代表电池电能耗尽后的增程运行模式。该模式下发动机/发电机组产生的能量若有剩余，则会为电池提供电量，使电池处于充电状态，故在电量消耗模式下电池的 SOC 值是一个变化值，考虑到应防止电池频繁充放电，所以该模式下的转换判断图应是单向起作用。如图 5.8 所示，在电量消耗模式下，发动机/发电机组为电池充电，电池 SOC 值达到最高值时，发动机关闭，转为纯电动行驶，此时仍为电量消耗模式，而一旦 SOC 值小于最低值，系统进入电量保持模式后，控制系统则不应回到电量消耗模式下。在电量消耗模式下，当需求功率小于等于零时，设置为制动能量回收模式，将一部分能量回馈给电池。电量消耗模式下的驱动功率分配如图 5.9 所示，横坐标以上是指电池为汽车提供行驶动力，横坐标以下区域为制动能量回收模式。

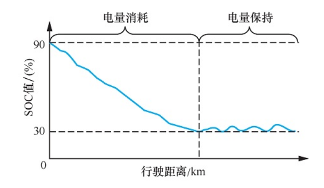


图 5.8 增程式电动汽车的两种模式转换

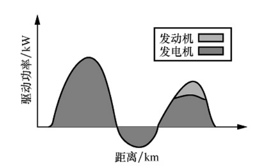


图 5.9 电量消耗模式下的驱动功率分配

3. 增程模式控制策略

汽车在纯电动模式下运行，电池的SOC值降低到最低值时，增程系统会开启，进入增程模式运行，在功率跟随模式下，发动机工作在最低燃油消耗率区域。此时包括两条能量传递路线，一条为发动机—发电机—传动系统—电动机；另一条路线是经过电池环节的能量传递，路线为发动机—发电机—电池—电动机。为了比较两条能量传递路线的动力性和经济性，设在传动系统的最末端驱动电动机的需求功率都为 P_{req}，发动机的输入功率分别设为 P_{e1} 和 P_{e2}，按照第一条路径，需求功率经过发电机的转化后传递给驱动电动机，经过这样的能量转换后的发动机能量利用率较高，发动机输入功率为

$$P_{e1}=\frac{P_{req}}{\eta_{mc}\eta_{g}} \tag{5-29}$$

式中，η_g 为发动机到发电机的效率。

第二条能量传递路径是在发动机作为动力源且有剩余功率时，剩余的能量转化为电能储存在电池中。这种情况下发动机/发电机组提供的电能非常充足，也就是说发动机所提供的功率可以满足所有工况需求，当汽车行驶所需的功率或者转矩较小时，发动机的富余能量提供给电池，此时的发动机输入功率为

$$P_{e2}=\frac{P_{req}}{\eta_{mc}\eta_{g}\eta_{dis}\eta_{ch}} \tag{5-30}$$

式中，η_{dis} 为电池的放电效率；η_{ch} 为电池的充电效率。

可以看出，在发动机的输出功率一定的情况下，第一条能量传递路线的经济性更好。由于电池的充放电效率相对较低，所以第二种能量传递路线的能量损失较大。但从整车运行工况来看，如果只采用第一种能量传递路线，所对应的发动机运行状态与传统发动机一样，能量利用率非常低。所以应根据不同的工况分析这两条不同的能量传递路线。

电池放电效率与电池放电功率和电池内部储存的功率有关。根据发动机的万有特性曲线，标记出发动机燃油经济性的最优工作区，并计算电池的充电效率和放电效率。电池放电效率为

$$\eta_{dis}=\frac{P_{dis}}{P_{store}} \tag{5-31}$$

式中，P_{dis} 为电池放电功率；P_{store} 为电池内部储存功率。

电池放电功率为

$$P_{dis}=\frac{P_{req}}{\eta_{t}\eta_{mc}} \tag{5-32}$$

式中，P_{req} 为汽车需求功率。

电池充电效率为

$$\eta_{ch}=\frac{P_{store}}{P_{ch}}=\frac{P_{dis}+I_{dis}^{2}R_{dis}}{P_{store}+I_{ch}^{2}R_{ch}} \tag{5-33}$$

式中，P_{ch} 为充电功率；I_{dis} 为放电电流；I_{ch} 为充电电流；R_{dis} 为放电内阻；R_{ch} 为充电内阻。

放电电流为

$$I_{dis}=\frac{P_{dis}}{U_{dis}} \tag{5-34}$$

式中，U_{dis} 为放电电压。

充电电流为

$$I_{ch}=\frac{P_{store}}{U_{ch}} \tag{5-35}$$

式中，U_{ch} 为充电电压。

电动机转速为

$$n_m(t)=\frac{1000Vk(t)}{2\pi\cdot 60r} \tag{5-36}$$

式中，$k(t)$ 为汽车的传动比。

电动机转矩为

$$T_m(t)=\frac{9550P_{req}}{n_m(t)} \tag{5-37}$$

由于在电量保持模式下的电池 SOC 值变化不大，因此工况的不同对 U_{dis}、U_{ch} 和 R_{dis}、R_{ch} 等参数数值的变化影响很小，为了计算简便，将这四个参数看作常量。

通过以上的计算公式，结合匹配得到的部件参数，得出两种能量传递路线的发动机临界值为 5.4kW，发动机高效区域为 2000～4000r/min，发动机的最优工作区域为 16.7～41.8kW。

电池 SOC=33%～80%是高效放电区，所以将该区域设定为工作区。为了减少电池的充放电损失，提高能量转换效率，电池的工作区间应该在其充放电时内阻相对较低的区域。另外，使电池电量保持在中间 SOC 值范围内，能有效延长电池寿命。为了保证汽车运行时电池能够随时高效地输出和接收电能，以及保证电池的安全性，能量管理策略需要维持电池荷电状态的平衡。电池内阻随 SOC 值变化的工作范围和充放电区间如图 5.10 所示，图中内阻值为单个模块的内阻。

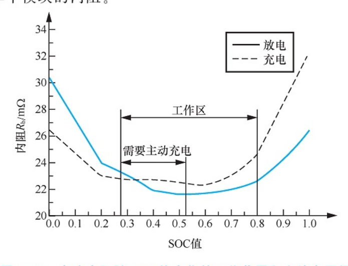


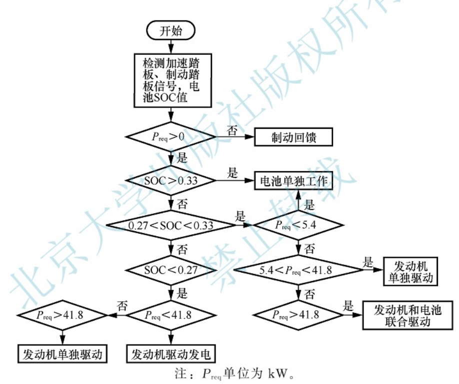
图 5.10 电池内阻随 SOC 值变化的工作范围和充放电区间

通过对发动机工作区域的划分及电池最优充放电 SOC 区域值的划分，将驱动模式下的工作状态分为六个区域，见表 5-1。此外，将需求功率小于零的状态，定义为制动能量回收阶段。

表 5-1 增程模式工作状态

工作状态	SOC 值	需求功率 P_{req}/kW
电池单独工作	0.33<SOC<0.8	$P_{req}>0$
电池单独工作	0.27<SOC<0.33	$P_{req}<5.4$
发动机单独工作	0.27<SOC<0.33	$5.4<P_{req}<41.8$
发动机和电池联合驱动	0.27<SOC<0.33	$P_{req}>41.8$
发动机驱动发电	SOC<0.27	$P_{req}<41.8$
发动机单独驱动	SOC<0.27	$P_{req}>41.8$

根据以上的工作状态划分，得出增程式电动汽车的控制流程状态转换逻辑框图，如图 5.11所示。



注：P_{req}单位为 kW。

图 5.11 增程式电动汽车的控制流程状态转换逻辑框图

5.4 增程式电动汽车的动力系统建模与仿真

通过建模仿真来模拟增程式电动汽车的实际运行工况，预测汽车在各种条件下的动力性能，既能够方便地对参数进行合理优化，调整设计方案，又能减少研发时间。Cruise 软件可以方便地建立多种汽车模型，用来模拟汽车的动力性、燃油经济性和排放性能，在软件中建立的模型可以非常直观地表示部件的结构布置，计算过程快速、准确。Cruise 的典型应用是在汽车开发过程中对动力传动系统的研究，预测实车的动力性能、燃油消耗量、排放性能、制动性能等。

5.4.1 Cruise 平台整车建模

根据匹配出的动力系统数据及已知的整车参数，在 Cruise 建立整车模型，如图 5.12 所示。

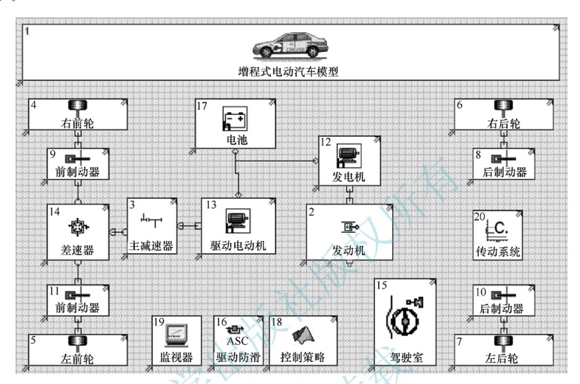


图 5.12 整车模型

整车结构采用前置前驱方案，模型包括整车模块、发动机模块、发电机模块、电池模块、驱动电动机模块、主减速器、差速器、制动模块，用于整车动力性、燃油消耗量和排放性的实时监测和仿真，还可以评价虚拟的主观平顺性。

1. 模块参数设计

模块的参数是根据所设计的动力传动系统部件和已有车型来确定的。对各个部件进行设置，以准确实现对匹配好的参数进行仿真分析，包括基本参数和性能参数的输入。模型的输入可以采用手工输入、从已有模型中调入数据、从已有数据文件中导入数据和通过复制与粘贴方式输入数据四种方式。

由于在 Cruise 软件中搭建的模型较难实现增程式电动汽车各种工作模式的转换，因此模型中添加了 MatLab 控制模块，通过信号接口接收来自驾驶人的输入信息、发动机信号、转速、制动信号等。控制模块接口如图 5.13 所示。Simulink 控制模型及 Stateflow 状态转化模型中的参数定义都是与这些接口模块匹配的。

2. 部件间的信息连接

部件间的信息连接包括三种：机械连接、电气连接和总线信息连接。模型中实现的是整车系统中的机械连接和总线信息连接，其中机械连接又叫物理连接；电气连接实现了发电机和电池及电池和电动机之间的连接。最后要设置模型中的总线信息连接，如图 5.14 所示，通过控制模块进行发动机的起停控制，采集信号并将信号传递到控制模块输入端

MatLab DLL - Control Strategy

Description of Data Bus

Data Bus Channel	Description	Unit	Connection
Inport 0	Cockpit Load Signal		optional
Inport 1	Brake Pressure	bar	optional
Inport 2	Velocity	km/h	optional
Inport 3	SOC	%	optional
Inport 4	Start Switch		optional
Inport 5	Net Voltage	V	optional
Inport 6	Battery Current	A	optional
Inport 7	Battery Temperature	C	optional
Inport 8	Velocity_req	km/h	optional

图 5.13　控制模块接口

口，控制模块根据做好的控制策略进行判断，做出发动机的起停控制。

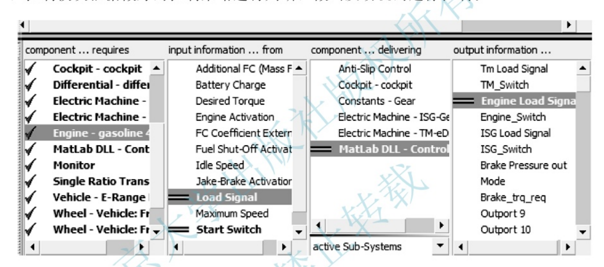


图 5.14　总线信息连接

总线信息连接中最左边一栏列出的是需要从别的零部件获得信息的部件，如发动机。

第二栏中定义了这个部件中所有需要的参数值，如节气门位置。

第三栏中列出了可以传递这种参数或变量信息的部件，如驾驶室，驾驶室是可以传递节气门位置的唯一一个部件，因为节气门位置的开度是由驾驶人操作实现的。

第四栏为可以传递信息的部件，如节气门。在 Cruise 中，预先设定好这些总线信息连接，这些部件就可以采集和传递汽车信息。例如，由驾驶室传递节气门位置信息到发动机控制模块，再由控制器决定发动机的输出转矩。

5.4.2　联合仿真模块

MatLab 接口模块用来实现与 Cruise 的联合仿真。Cruise 软件与 MatLab 的接口允许客户自定义模型元件及相关的控制策略，便于客户自己进行复杂控制。Cruise 与 MatLab 有三种连接方式。①Cruise Interface：Cruise 与 MatLab 的联合仿真分析（MatLab 在前台，而 Cruise 处在被调用状态）；②MatLab API：Cruise 与 MatLab 的联合仿真分析(Cruise 在前台，而 MatLab 处在被调用状态)；③MatLab DLL：通过 Simulink 模型生成的动态链接库(Dynamic Link Library，DLL)与 Cruise 进行耦合仿真。由于 Cruise 模型是

非常完整的模型，采用第三种方法，通过生成 MatLab/Simulink 的 DLL 文件实现与 Cruise 的联合仿真，如图 5.15 所示。

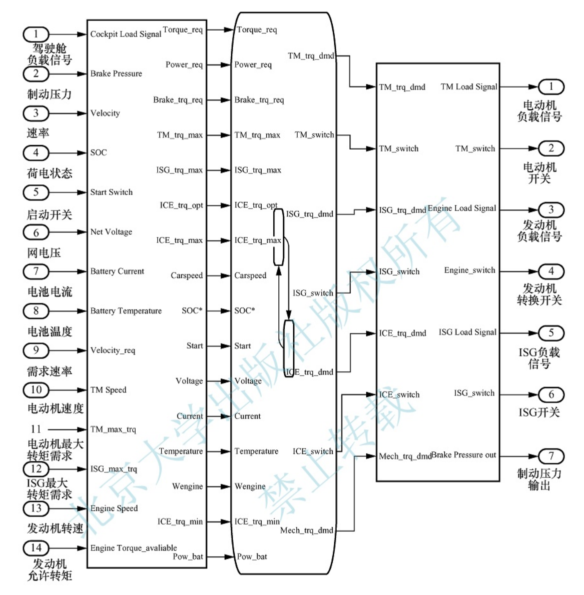


图 5.15 MatLab 与 Cruise 的接口文件

图 5.15 中最左边一列为整车模型中 MatLab 控制模块的十四个接口，实现与 MatLab 的连接，以实现接口的识别。这一列为子系统参数模型，定义了从 Cruise 中采集的接口参数与其他参数之间的关系。其中发动机的转矩曲线需要从 Cruise 中整车系统采集的数组模型中获得。最右边列为对应于 Cruise 中模型参数的七个输出接口：电动机负载信号、电动机开关、发动机负载信号、发动机开关转换、ISG 负载信号、ISG 开关和制动压力输出。

发动机的 Simulink 模型如图 5.16 所示。需要获得或输入的信息有发动机的输出转矩、发动机最大转矩、发动机最小转矩和由软件所采集监测到的发动机转矩信息。

图 5.15 的中间部分为不同的工作模式状态转换条件 Stateflow 模型，具体如图 5.17 所示。

Stateflow 模型由图形对象和非图形对象构成，模型中用方块表示系统的工作模式，带有方向箭头的线条表示状态转换的流向，每个工作模式状态都有执行条件和跳出条件，

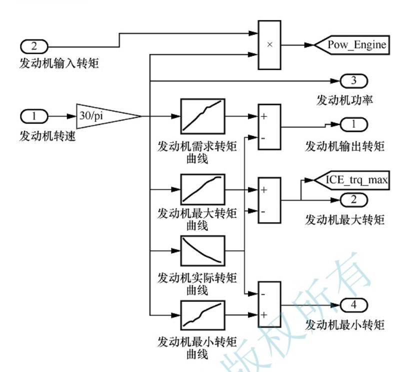


图 5.16　发动机的 Simulink 模型

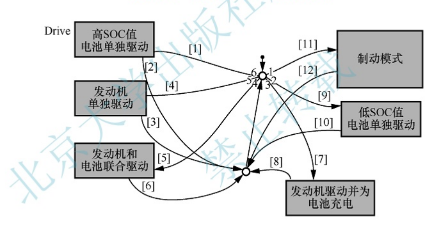


图 5.17　工作模式状态转换条件 Stateflow 模型

分别写在带箭头的线上。工作模式的状态转换条件见表 5-2，同时加入了汽车起停状态控制和制动能量回收模块。

表 5-2　工作模式的状态转换条件

序号	工作模式状态	SOC 值	需求功率/kW
1	转换到电池单独驱动	$0.33<SOC<0.8$	$P_{req}>0$
2	跳出状态 1	$SOC\leqslant 0.33$	$P_{req}>0$
3	发动机单独驱动	$0.27<SOC<0.33$	$5.4<P_{req}<41.8$
4	跳出状态 3	$SOC\leqslant 0.27 \parallel SOC\geqslant 0.33$	$P_{req}\geqslant 41.8 \parallel P_{req}\leqslant 5.4$
5	发动机和电池联合驱动	$0.27<SOC<0.33$	$P_{req}>41.8$
6	跳出状态 5	$SOC\leqslant 0.27 \parallel SOC\geqslant 0.33$	$P_{req}\leqslant 41.8$

续表

序号	工作模式状态	SOC 值	需求功率/kW
7	发动机驱动并为电池充电	SOC<0.27	$P_{req}<41.8$
8	跳出状态 7	SOC≥0.27	$P_{req}\geqslant 41.8$
9	电池单独驱动	0.27<SOC<0.33	$P_{req}<5.4$
10	跳出状态 9	SOC≤0.27 ‖ SOC≥0.33	$P_{req}\geqslant 5.4$
11	制动	SOC<0.8	$P_{req}\leqslant 0$
12	跳出状态 11	SOC≤0.8	$P_{req}>0$

开关信号及制动力矩模型如图 5.18 所示，其中制动力矩是与 Cruise 中汽车模型对应的，以实现不同软件中信号的识别。

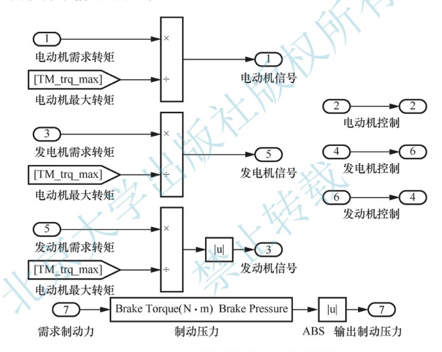


图 5.18 开关信号及制动力矩模型

5.4.3 仿真结果

为了更加准确地仿真增程式电动汽车的动力性、经济性、燃油消耗和排放等，对以下工况进行了仿真分析：①NEDC 循环行驶工况仿真，分别设置一个循环工况和多工况循环下的燃油消耗量与排放性能试验仿真；②爬坡性能仿真；③满载加速性能仿真；④最高车速性能仿真。

选择 NEDC 仿真工况做轻型车认证测试循环。NEDC 循环行驶工况车速和电动机功率消耗分别如图 5.19、图 5.20 所示。NEDC 工况，又称 28 工况，就是 13+15，有 X 挡加速、减速和匀速等 28 种工况组成，四个市区循环(4×195s)+一个市郊循环(400s)。

仿真也可以看作由两部分组成，前面为四个市区循环工况，后面为一个市郊循环工况。一个 NEDC 工况的总时间为 1180s，运行距离为 117.2km。

由于工况的运行距离为 11.2km，为纯电动行驶阶段，发动机和发电机起动，电池

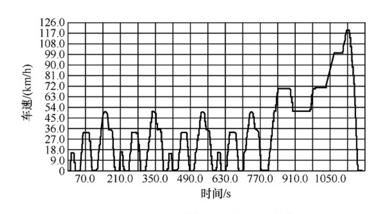


图 5.19　NEDC 循环行驶工况车速

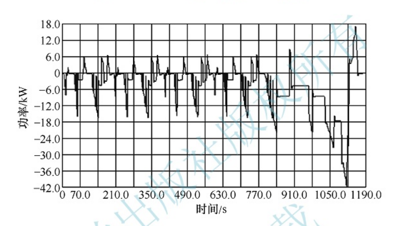


图 5.20　NEDC 循环行驶工况电动机功率消耗

SOC 值下降较小，从 80%下降到 72%，由此可得纯电动行驶里程约为 70km。因此纯电动行驶里程满足最初的设计目标。

从电动机功率曲线图上可以看出电动机功率跟随工况的变化情况，由于 NEDC 前面为多变的四个市区循环工况，电动机的功率变化较大，当功率为负时，是功率消耗区，负的功率为制动能量回收所增加的功率。可以看出在车速下降制动减速到零的过程中功率是由制动能量回收得到的。由 Cruise 中的 result 文件可以读取出燃油消耗和排放都为零，由于循环工况结束时 SOC 值为 0.72，因此此循环工况为纯电动行驶，发动机和发电机不起动。

为了更好地观测纯电动行驶和增程模式的整个工况过程，选定三个 NEDC 工况，在多个工况下循环试验，检测燃油消耗、排放等性能指标。图 5.21 所示为三个 NEDC 循环工况的目标速度，运行结束的仿真结果(即电动机功率、发动机转速和功率、SOC 值)如图 5.22～图 5.24 所示。

由三个图比较可以看出多工况下，电池 SOC 值降低到放电限值时，时间为 1900s，发动机开启，一部分能量提供给驱动电动机，另一部分能量为电池充电，电池 SOC 值开始升高，此时的电池功率有非常大的跳转，由放电时的负值变成了发动机为电池充电时的正值。当蓄电池 SOC 值上升到 60%时（约为 2450s)，由于工况的原因，此时为 NEDC 中的市区循环工况，目标转速下降，汽车需求功率较小，根据 Stateflow 模型中状态转换条件，关闭发动机/发电机组，使用电池的电能单独驱动汽车行驶。

读取三个 NEDC 工况时的 result 文件夹，可以得出燃油消耗仿真结果见表 5 - 3，由

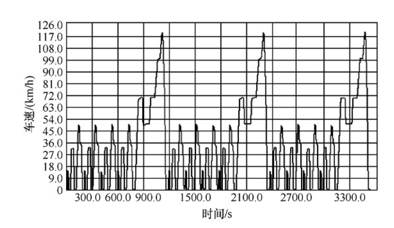


图 5.21 三个 NEDC 循环工况的目标车速

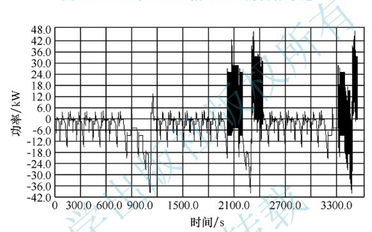


图 5.22 三个 NEDC 循环工况的电动机功率

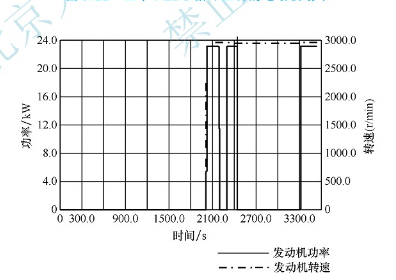


图 5.23 三个 NEDC 循环工况的发动机转速和功率

表 5-3 可看出增程式电动汽车由于首先采用纯电动模式行驶，在长途行驶时，发动机/发电机组才起动，驱动汽车行驶，在增程模式下，当需求功率较小时，也采用关闭发动机/发电机组的控制策略，因此燃油经济性高，排放性能好。

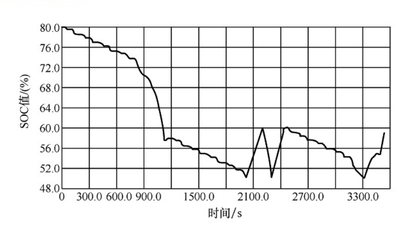


图 5.24 三个 NEDC 循环工况 SOC 值

表 5-3 燃油消耗仿真结果

项目	数值	项目	数值
工况	NEDC	燃油消耗率/(L/100km)	0.22
循环周期	3	总燃油消耗/kg	0.0544
时间/s	13540	怠速燃油消耗/kg	0.0075
NO 排放/g	45.9	加速燃油消耗/kg	0.0106
CO 排放/g	113.4	常速燃油消耗 kg	0.0268
HC 排放/g	9.58	减速燃油消耗/kg	0.0095

爬坡度仿真结果见表 5-4，爬坡工况的电动机转矩和功率如图 5.25 所示。由此可以看出，增程式电动汽车在不同车速时的爬坡度及爬坡性能远远超出了预期的设计目标要求。

表 5-4 爬坡度仿真结果

电动机转速/(r/min)	车速/(km/h)	爬坡度/(%)	电动机转速/(r/min)	车速/(km/h)	爬坡度/(%)
1000	18.73	44.24	5700	112.39	7.22
4000	74.93	13.80			

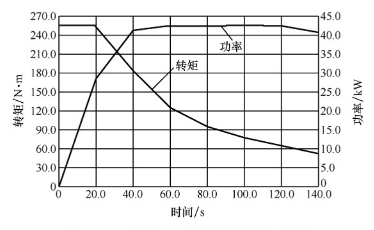
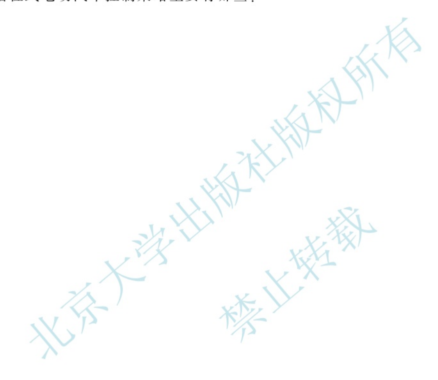


图 5.25 爬坡工况的电动机转矩和功率

最高车速任务仿真所得的仿真结果是此增程式电动汽车的最高车速为140km/h，与预期的设计目标一致。读取result文件获得的加速性能仿真结果为3.2s，与预期的设计目标相比，加速能力的余量不大。



1. 增程式电动汽车由哪几部分组成？
2. 增程式电动汽车有何特点？
3. 在增程式电动汽车设计中，如何匹配驱动电动机、动力电池和增程器的参数？
4. 增程式电动汽车控制策略主要有哪些？



第 6 章　混合动力汽车


【奥迪插电式混合动力汽车】

国际电子技术委员会对混合动力汽车的定义：在特定的工作条件下，可以从两种或两种以上的能量储存器、能量源或能量转换器中获取驱动能量的汽车，其中至少一种储存器或转换器要安装在汽车上。混合动力汽车至少有一种能量储存器、能量源或能量转换器可以传递电能。串联式混合动力汽车只有一种能量转换器可以提供驱动力，并联式混合动力汽车则有多种能量转换器提供驱动力。

6.1　概　　述

6.1.1　混合动力汽车的分类

混合动力汽车的分类如图 6.1 所示。

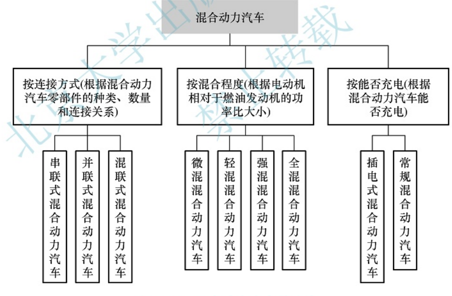


图 6.1　混合动力汽车的分类

6.1.2　混合动力汽车的组成与原理


【混合动力汽车的结构】

1. 串联式混合动力汽车

串联式混合动力汽车的结构组成如图 6.2 所示。它是由发动机、发电机和电动机三大主要部件总成组成的。发动机仅仅用于发电，发电机发出的电能通过电机控制器直接输送到电动机，由电动机产生的电磁力矩驱动汽车行驶。发电机发出的部分电能向电池充电，来延长混合动力汽车的行驶里程。另外，电

池还可以单独向电动机提供电能来驱动汽车，使混合动力汽车在零污染状态下行驶。

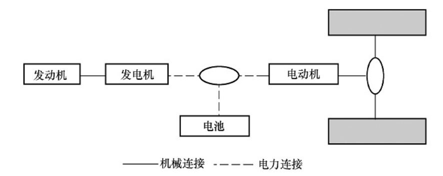
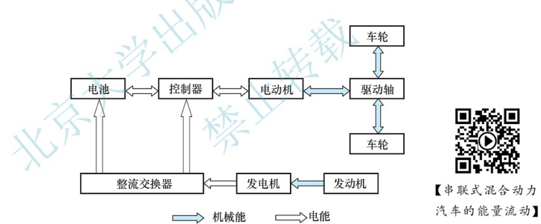


图 6.2 串联式混合动力汽车的结构组成

在串联式混合动力汽车上，由发动机带动发电机所产生的电能和电池输出的电能，共同输送给电动机来驱动汽车行驶，电力驱动是唯一的驱动模式，动力流程如图 6.3 所示。电动机直接与驱动桥相连，发动机与发电机直接连接产生电能，来驱动电动机或者给电池充电，汽车行驶时的驱动力由电动机输出，储存在电池中的电能转化为车轮上的机械能。当电池的 SOC 值降到预定值时，发动机即开始对电池进行充电。发动机与驱动系统并没有机械地连接在一起，这种方式可以很大程度地减少发动机受到的汽车瞬态响应。瞬态响应的减少可以使发动机进行最优的喷油和点火控制，使其在最佳工况点附近工作。



【串联式混合动力汽车的能量流动】

图 6.3 串联式混合动力汽车的动力流程

串联式混合动力汽车的发动机能够经常保持在稳定、高效、低污染的运转状态，使有害气体的排放被控制在最低范围。串联式混合动力汽车从总体结构上看，比较简单，易于控制，因只有电动机的电力驱动系统，其特点更加趋近于纯电动汽车。三大部件总成在电动汽车上布置起来有较大的自由度，但各自的功率较大，外形较大，质量也较大，因此，在中小型电动汽车上布置有一定的困难。另外，在发动机-发电机-电动机驱动系统中的热能—电能—机械能的能量转换过程中，能量损失较大。从发动机发出的能量以机械能的形式从曲轴输出，并立即被发电机转化为电能，由于发电机的内阻和涡流，将会产生能量损失(效率为 90%～95%)。电能随后又被电动机转化为机械能，在电动机和控制器中能量又进一步损失，平均效率为 80%～85%。能量转换的效率要比内燃机汽车低，故串联式混合动力驱动系统较适合在大型客车上使用。

2. 并联式混合动力汽车

并联式混合动力汽车的结构组成如图6.4所示。它主要由发动机、电动机两大部件总成组成，有多种组合形式，可以根据使用要求选用。两大动力总成的功率可以互相叠加，发动机功率和电动机功率为汽车所需最大驱动功率的0.5～1，因此，可以采用小功率的发动机与电动机/发电机，使得整个动力系统的装配尺寸、质量都较小，造价也更低，行程也比串联式混合动力汽车的长一些，其特点更加趋近于内燃机汽车。并联式混合动力驱动系统通常被应用在小型混合动力汽车上。

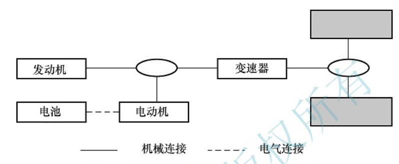


图6.4 并联式混合动力汽车的结构组成

并联式混合动力汽车的动力流程如图6.5所示。发动机和电动机通过某种变速装置同时与驱动桥直接相连接。电动机可以用来平衡发动机所受的载荷，使其能在高效率区域工作，因为通常发动机工作在满负荷(中等转速)下，燃油经济性最好。当汽车在较小的路面载荷下工作时，内燃机汽车的发动机燃油经济性比较差，而并联式混合动力汽车的发动机此时可以关闭而只用电动机来驱动汽车，或者增加发动机的负荷使电动机作为发电机，给电池充电以备后用(即一边驱动汽车，一边充电)。由于并联式混合动力汽车在稳定的高速下发动机具有比较高的效率和相对较小的质量，因此它在高速公路上行驶时具有较好的燃油经济性。

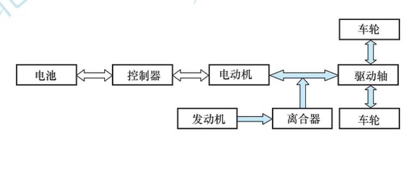


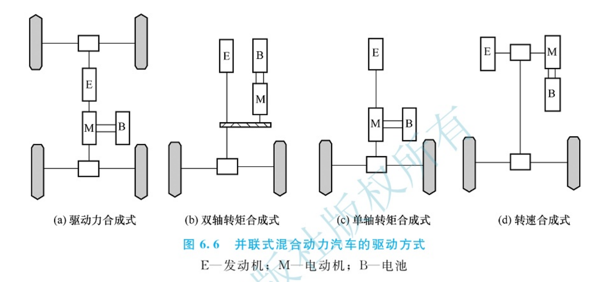
图6.5 并联式混合动力汽车的动力流程

并联式驱动系统有两条能量传输路线，可以同时使用电动机和发动机作为动力源来驱动汽车，这种设计方式可以使其以纯电动汽车或低排放汽车的状态运行，但此时不能提供全部的动力能源。

并联式驱动系统的主要元件为动力合成装置，由于动力合成的实现方法具有多样性，相应的动力传动系统结构也多种多样，通常可将其分为驱动力合成式、转矩合成式和转速

合成式三类。

（1）驱动力合成式。驱动力合成式并联混合动力汽车示意图如图 6.6(a)所示。其采用一个小功率的发动机，单独地驱动汽车的前轮。电动机驱动系统单独地驱动汽车的后轮，可以在汽车起动、爬坡或加速时增加混合动力汽车的驱动力。两套驱动系统可以独立驱动汽车，也可以联合驱动汽车，使汽车变成四轮驱动的电动汽车。此种混合动力汽车具有四轮驱动汽车的特性。



(a) 驱动力合成式　(b) 双轴转矩合成式　(c) 单轴转矩合成式　(d) 转速合成式

图 6.6　并联式混合动力汽车的驱动方式

E—发动机；M—电动机；B—电池

（2）转矩合成式(双轴式和单轴式)。转矩合成式并联混合动力汽车示意图如图 6.6(b)和图 6.6(c)所示。发动机通过传动系统直接驱动混合动力汽车，并直接(单轴式)或间接(双轴式)带动电动机/发电机转动向电池充电。电池也可以向电动机/发电机提供电能，此时电动机/发电机转化为电动机，可以用来起动发动机或驱动汽车。

（3）转速合成式。转速合成式并联混合动力汽车示意图如图 6.6(d)所示。发动机通过离合器和一个“动力组合器”来驱动汽车，电动机也通过“动力组合器”来驱动汽车。其可以利用普通内燃机汽车的大部分传动系统的总成，电动机只需通过“动力组合器”与传动系统连接，结构简单，改制容易，维修方便。通常“动力组合器”就是一个行星齿轮机构，这种装置使发动机或电动机之间的转速可以灵活地分配，但它们组合在特定的“动力组合器”中，因为“动力组合器”使它们的转矩固定在汽车行驶时的转矩上，要通过调节发动机节气门的开度来与电动机的转速相互配合，才能获得最佳传动效果，从而使得控制装备变得十分复杂。

3. 混联式混合动力汽车

【混联式混合动力汽车】

混联式驱动系统是串联式与并联式的综合。混联式混合动力汽车的结构组成如图 6.7 所示。发动机发出的功率一部分通过机械传动输送给驱动桥，另一部分则驱动发电机发电。发电机发出的电输送给电动机或电池，电动机产生的驱动力矩通过动力复合装置传送给驱动桥。混联式驱动系统的控制策略：在汽车低速行驶时，驱动系统主要以串联方式工作；当汽车高速稳定行驶时，驱动系统则以并联方式为主。

目前，混联式混合动力结构一般采用行星齿轮机构作为动力分配装置。有一种最佳的混联式结构是将发动机、发电机和电动机通过一个行星齿轮装置连接起来，动力从发动机输出到与其相连的行星架，行星架将一部分转矩传送到发电机，另一部分传送到传动轴，

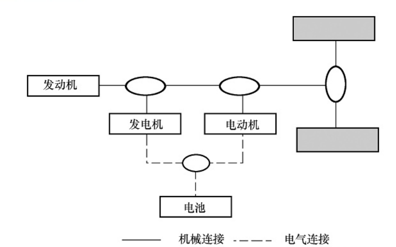


图 6.7　混联式混合动力汽车的结构组成

同时发电机也可以驱动电动机来驱动传动轴。这种机构有两个自由度，可以自由地控制两个不同的速度。此时汽车并不是串联式或并联式，而是两种驱动形式同时存在。这种形式充分利用了两种驱动形式的优点。其动力流程如图 6.8 所示。

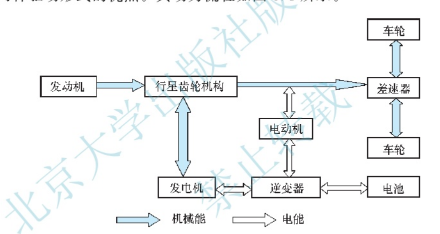


图 6.8　混联式混合动力汽车的动力流程

混联式驱动系统充分发挥了串联式和并联式的优点，能够使发动机、发电机、电动机等部件进行更多的优化匹配，从而在结构上保证了在更复杂的工况下使系统在最优状态工作，更容易实现排放和油耗的控制目标，因此混联式混合动力汽车是最具影响力的混合动力汽车。

与并联式相比，混联式的动力复合形式更复杂，因此对动力复合装置的要求更高。目前的混联式结构一般以行星齿轮机构作为动力复合装置的基本构架。

6.1.3　混合动力汽车的动力耦合类型

混合动力汽车是发动机与电动机两种动力混合驱动的汽车，这种混合是通过动力耦合器的耦合作用实现的。动力耦合器的形式不仅决定了混合动力汽车具备的工作模式，而且是功率分配策略制定的依据，并最终对整车的动力性、经济性和排放性产生重要影响。

动力耦合类型主要有转矩耦合、转速耦合、功率耦合和牵引力耦合等。

1. 转矩耦合

转矩耦合式动力系统是指两个(或多个)动力源的输出动力在耦合过程中，输出转矩相互独立，而输出转速必须互成比例，最终的合成转矩是两个动力源输出转矩的耦合叠加。

转矩耦合方式可以通过齿轮耦合、磁场耦合、链或带耦合等多种方式实现。

(1) **齿轮耦合方式**。齿轮耦合方式是通过啮合齿轮(组)将多个输入动力合成在一起输出。这种耦合方式结构简单，可以实现单输入、多输入等多种驱动形式，耦合效率较高，控制相对简单；但由于齿轮是刚性啮合的，在动力切换、耦合过程中易产生冲击。

齿轮耦合式混合动力汽车的结构组成如图 6.9 所示。

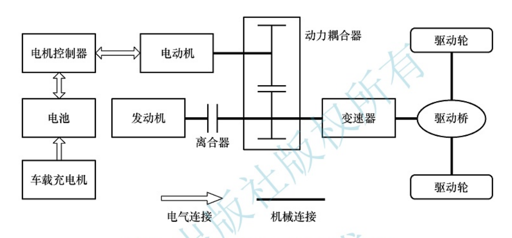


图 6.9 齿轮耦合式混合动力汽车的结构组成

合成输出转矩为

$$T_3 = \eta_0 (T_1 + i_k T_2) \tag{6-1}$$

式中，T_1 为发动机输出转矩；T_2 为电动机输出转矩；T_3 为发动机和电动机的合成输出转矩；η_0 为耦合效率；i_k 为从电动机到发动机的传动比。

合成输出转速为

$$n_3 = n_1 = n_2 / i_k \tag{6-2}$$

式中，n_1 为发动机输出转速；n_2 为电动机输出转速；n_3 为发动机和电动机的合成输出转速。

(2) **磁场耦合方式**。磁场耦合方式是将电动机的转子与发动机输出轴做成一体，通过磁场作用力将电动机的输出动力和发动机的输出动力耦合在一起。这种耦合方式效率高，结构紧凑，耦合冲击小，能量回馈方便；但混合度低，电动机一般只能起辅助驱动的作用。由于电动机转子具有一定的惯性，因此多用于轻度混合动力汽车上，是目前采用较多的动力耦合方式，如本田 Insight 混合动力汽车采用的就是磁场耦合方式。

磁场耦合式混合动力汽车的结构组成如图 6.10 所示。

合成输出转矩为

$$T_3 = T_1 = T_2 \tag{6-3}$$

合成输出转速为

$$n_3 = n_1 = n_2 \tag{6-4}$$

(3) **链或带耦合方式**。链或带耦合方式是把齿轮改为链条或带，通过链条或带将两个动力源的输出动力进行合成。这种耦合方式结构简单，冲击小；但耦合效率低。

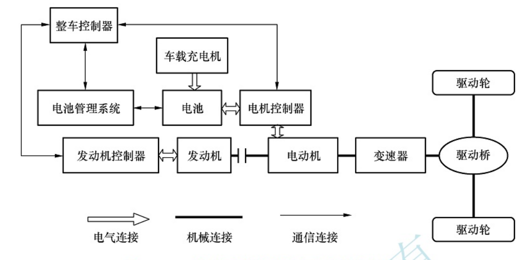


图 6.10 磁场耦合式混合动力汽车的结构组成

转矩耦合方式的特点是发动机的转矩可控，而发动机转速不可控；通过控制电动机的转矩来调节发动机的转矩，使发动机工作在最佳油耗曲线附近。转矩耦合方式结构简单，传动效率高，而且无需专门设计耦合机构，便于在原车基础上改装。

2. 转速耦合

转速耦合式动力系统是指两个（或多个）动力源的输出动力在耦合过程中，输出转速相互独立，而输出转矩必须互成比例，最终的合成转速是两个动力源输出转速的耦合叠加，合成转矩则不是两个动力源输出转矩的叠加。合成转速为

$$n_3 = pn_1 + qn_2 \tag{6-5}$$

式中，n_1 为动力源 1 的输出转速；n_2 为动力源 2 的输出转速；n_3 为动力源 1 和动力源 2 的合成转速；p、q 为转速耦合系数，由耦合器的结构决定。

转速耦合方式可以通过行星齿轮耦合、差速器耦合等方式实现。

（1）**行星齿轮耦合方式**。行星齿轮耦合方式是一种普遍采用的动力耦合方式，通常发动机输出轴与太阳轮连接，电动机与齿圈连接，行星架作为输出端。这种耦合方式结构简单，传动效率高，混合度高，并且还可以实现多种形式驱动，动力切换过程中冲击力小，但整车驱动控制难度较大。图 6.11 所示为行星齿轮耦合方式。

（2）**差速器耦合方式**。差速器耦合方式是行星齿轮耦合的一种特殊情况，其耦合方式与行星齿轮耦合方式基本类似，只是二者对发动机和电动机的动力性能要求不同，从而导致动力混合程度不同。差速器耦合方式要求发动机和电动机动力参数相当，动力混合程度比较高。

图 6.12 所示为差速器耦合方式。

转速耦合方式的特点是发动机的转矩不可控，发动机的转速可以通过对电动机的转速调整而得到控制。在行驶过程中采用转速耦合方式的混合动力汽车，可以通过调整电动机的转速来调节发动机的转速，使发动机在最佳油耗曲线附近工作。即使在发动机的工作点不变的情况下，通过连续调整电动机的转速，也可以使车速连续变化，因此，采用转速耦合方式的混合动力汽车不需无级变速器便可以实现整车的无级变速。

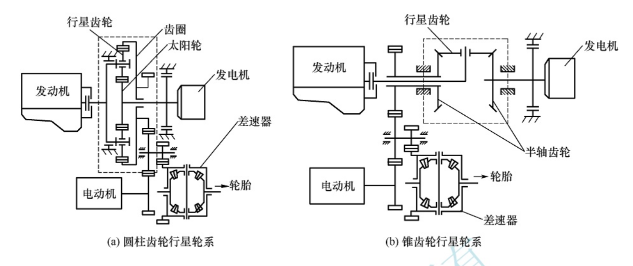


图 6.11　行星齿轮耦合方式

3. 功率耦合

功率耦合方式的输出转矩与转速分别是发动机与电动机转矩和转速的线性和，因此发动机的转矩和转速都可控。

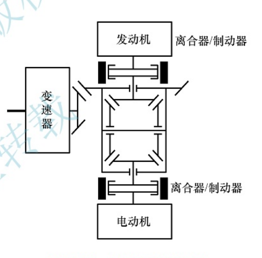


图 6.12　差速器耦合方式

在采用功率耦合方式的混合动力汽车中，发动机的转矩和转速都可以自由控制，而不受汽车工况的影响。因此，理论上可以通过调整电动机的转速和转矩，使发动机始终在最佳油耗点工作。但实际上，频繁调整发动机工作点也可能会使经济性有所下降，因此，通常的做法是将发动机的工作点限定在经济区域内，缓慢调整发动机的工作点，使发动机工作相对稳定，经济性能提高。采用功率耦合方式的混合动力电动汽车理论上不需要离合器和变速器，而且可实现无级变速。与前两种耦合方式相比，功率耦合方式无论是对发动机工作点的优化，还是在整车变速方面，都更具优越性。丰田普锐斯混合动力汽车采用的单/双行星排混合动力系统，雷克萨斯 RX400h 混合动力汽车采用的双行星排混合动力系统，其耦合方式都属于功率耦合方式。

雷克萨斯 RX400h 混合动力汽车的动力耦合系统如图 6.13 所示。发动机和电动机 1 通过前排行星齿轮进行转速耦合，通过速度合成实现电动机 1 对发动机转速的调节，使发动机转速与车速相独立，实现动力耦合器功能；转速合成之后的动力再与电动机 2 的动力形成转矩耦合。

功率耦合方式汇集了转矩耦合方式和转速耦合方式的优点，能实现多种工作模式，可以充分发挥混合动力汽车节能减排的优势。虽然功率耦合方式结构复杂，控制困难，但随着制造技术和控制技术的发展，这种耦合方式已经成为混合动力汽车的发展趋势。

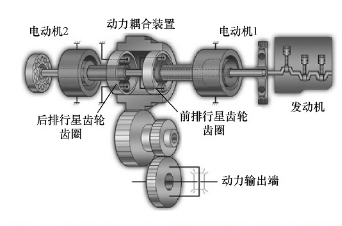


图 6.13　雷克萨斯 RX400h 混合动力汽车的动力耦合系统

4. 牵引力耦合

牵引力耦合方式是指发动机驱动前轮（后轮），电动机驱动后轮（前轮），通过前后车轮驱动力将多个动力源输出动力耦合在一起。这种耦合方式结构简单，改装方便，可实现单、双模式驱动及制动再生等多种驱动方式；但整车的驱动控制更复杂，适合于四轮驱动。

各种动力耦合方式的比较见表 6-1。

表 6-1　各种动力耦合方式的比较

耦合方式		混合度	平顺性	复杂性	效率	控制	能量回收	成本
转矩耦合	齿轮耦合	中	差	低	高	容易	中	低
	磁场耦合	中	好	中	高	中	容易	中
	链或带耦合	低	中	低	低	容易	中	低
转速耦合	行星齿轮耦合	中	中	低	高	中	难	低
	差速器耦合	高	中	低	高	中	难	低
功率耦合		高	好	高	中	较难	容易	高
牵引力耦合		高	好	中	高	难	中	中

6.1.4　混合动力汽车的特点

混合动力汽车是将原动机、电动机、能量储存装置(电池)等组合在一起，它们之间的良好匹配和优化控制，可充分发挥内燃机汽车和电动汽车的优点，避免各自的不足，是当今最具实际开发意义的低排放和低油耗汽车。较之纯电动汽车，混合动力汽车具有如下的优点。

（1）由于有原动机作为辅助动力，电池的数量和质量可减少，因此汽车自身质量可以减小。

（2）汽车的续驶里程和动力性可达到内燃机汽车的水平。

（3）借助原动机的动力，可带动空调、真空助力、转向助力及其他辅助电器，不需消

耗电池有限的电能，从而保证了驾车和乘坐的舒适性。

较之内燃机汽车，混合动力汽车具有如下的优点。

(1) 可使原动机在最佳的工况区域稳定运行，避免或减少发动机变工况下的不良运行，使得发动机的排污和油耗大为降低。

(2) 在人口密集的商业区、居民区等地可用纯电动方式驱动汽车，实现零排放。

(3) 可通过电动机提供动力，因此可配备功率较小的发动机，并可通过电动机回收汽车减速和制动时的能量，进一步降低汽车的能量消耗和排污。

显然，研发混合动力汽车的主要目的就是要减少石油能源的消耗，减少汽车尾气中的有害气体量，降低大气污染。

表6-2对不同类型的混合动力汽车在燃油经济性、低排放性能、成本、复杂程度和控制难易程度方面做了比较。表6-3列出了不同类型的混合动力汽车的动力总成、驱动模式、传动效率、制动能量回收、整车布置、适用条件。

表6-2 不同类型混合动力汽车性能的比较

性　　能	串联式	并联式	混联式
公路行驶燃油经济性	较优	优	优
城市行驶燃油经济性	优	较优	优
无路行驶燃油经济性	较优	优	优
低排放性能	优	较优	较优
成本	低	较低	较低
复杂程度	简单	较复杂	复杂
控制难易程度	简单	较复杂	复杂

表6-3 不同类型的混合动力汽车的特点

项　　目	串联式	并联式	混联式
动力总成	发动机、发电机、驱动电动机三大动力总成	发动机、电动机/发电机（或电动机）两大动力总成	发动机、电动机/发电机、电动机三大动力总成
驱动模式	电动机是唯一的驱动模式	发动机驱动模式、电动机驱动模式、发动机/电动机混合驱动模式	发动机驱动模式、电动机驱动模式、发动机/电动机混合驱动模式、电动机/发电机混合驱动模式
传动效率	传动效率较低	传动效率较高	传动效率较高
制动能量回收	能够回收制动能量	能够回收制动能量	能够回收制动能量
整车布置	三大动力总成之间没有机械式连接装置，结构布置的自由度较大，但三大动力总成的质量、尺寸都较大，一般在大型汽车上采用	发动机驱动系统保持机械式传动系统，发动机与电动机两大动力总成之间被不同的机械装置连接起来，结构复杂，使布置受到一定的限制	三大动力总成之间采用机械装置连接，三大动力总成的质量、尺寸都较小，能够在小型汽车上布置，但结构更加紧凑

续表

项　　目	串联式	并联式	混联式
适用条件	适用于大型客车或货车，适于在路况较复杂的城市道路和普通公路上行驶，更加接近电动汽车性能	适用于中小型汽车，适于在城市道路和高速公路上行驶，接近普通的内燃机汽车性能	适用于各种类型的汽车，可在各种道路上行驶，更加接近普通的内燃机汽车性能

6.1.5 混合动力汽车的关键技术

混合动力汽车以先进的控制技术为纽带，是传统燃油汽车与纯电动汽车的一种过渡性车型，其关键技术涵盖机电工程、电力电子、电化学、控制工程、汽车电子和车辆工程等多学科。混合动力汽车的关键技术包括驱动电动机及其控制技术、动力电池及其管理系统、整车能量管理控制系统、动力传动系统匹配、制动能量回收系统、先进车辆控制技术等。

1. 驱动电动机及其控制技术

电动机是电动汽车的心脏，对于混合动力汽车来说，电动机的重要性与发动机是等同的。混合动力汽车对驱动电动机的要求是能量密度高、体积小、质量轻、效率高。从发展趋势来看，电驱动系统的研发主要集中在交流感应电动机和永磁同步电动机上。对于高速、匀速行驶工况，采用感应电动机驱动较合适；而对于经常起动、停车、低速运行的城市工况，采用永磁同步电动机驱动效率较高。

驱动电动机的控制技术包括大功率电子器件、转换器、微处理器及电动机控制算法等。高性能的电力电子器件仍处于研究中，并且向微电子技术与电力电子技术集成的第四代功率集成电路方向发展。转换器技术随着功率器件的发展而发展，可分为 DC/DC 直流斩波器和 DC/AC 逆变器，分别用于直流电动机和交流电动机。电动机控制微处理器主要有单片机和 DSP 芯片。目前电动机控制专用 DSP 芯片已被广泛采用，将微处理器与功率器件集成到一块芯片上（即 PTC 芯片）是目前的研究热点。

当前常规电动机驱动领域的控制方法如矢量控制、变压变频控制、模型参考自适应控制、直接转矩控制、自调整控制等都已被用到电动汽车的驱动控制中来，但电动汽车控制有其自身特点，要求在恒转矩区、恒功率区都保持效率高、调速范围大、动态响应快等性能。从目前的实践看，感应电动机和永磁同步电动机矢量控制是比较好的控制方法。近年来变结构控制、模糊控制、神经网络控制及专家系统控制等新兴控制方法也不断地在电动汽车中采用，效果也较理想。

2. 动力电池及其管理系统

动力电池是混合动力汽车的基本组成单元，其性能直接影响驱动电动机的性能，从而影响整车的燃油经济性和排放性能。混合动力汽车使用的电池工作负荷大，对功率密度要求较高，但体积和容量小，而且电池的 SOC 工作区间较窄，对循环寿命要求高。能否开发适合混合动力汽车的专用动力电池是决定混合动力汽车能否大量推广使用的重要因素之一。能否全面、准确地对动力电池进行管理，是决定动力电池能否发挥最佳效能的重要因素。

3. 整车能量管理控制系统

混合动力汽车的整车能量管理控制系统的主要功能是进行整车功率控制和工作模式切换的控制。整车能量管理控制系统如同混合动力汽车的大脑，指挥各个子系统的协调工作，以达到效率、排放和动力性的最佳，同时兼顾汽车行驶平顺性。

整车能量管理控制系统根据驾驶人的操作(如加速踏板、制动踏板、变速杆的操作等)，判断驾驶人的意图，在满足驾驶人需求的前提下，分配电动机、发动机、电池等动力部件的功率输出，实现能量利用率的最优管理，使有限的燃油发挥最大的功效。目前的混合动力汽车都不需要外部充电，与传统汽车一样，其整车驱动能量全部来自发动机的燃油热能，电动机驱动所需的电能是燃油热能在汽车行驶中转化为电能后储存在电池中的。能量管理策略的目标，就是使燃油能量转换效率尽可能高。

整车能量管理控制必须通过有效地控制混合动力系统的工作才能实现。此外，能量管理控制还需考虑其他车载电气附件和机械附件的能量消耗，如空调、动力转向、制动助力等系统的能耗，以综合考虑整车的能量使用。

4. 动力传动系统匹配

混合动力汽车动力传动系统的参数匹配是混合动力汽车设计的一个重要内容，其直接影响混合动力汽车的排放和燃油经济性能。它包括合理地选择和匹配发动机功率、动力电池容量和电动机的功率等，以确定汽车的混合度，来组成性能最优的混合驱动系统。

5. 制动能量回收系统

制动能量回收是混合动力汽车提高燃油经济性的又一重要途径。由于制动关系到行车安全性，如何在最大限度回收制动时的汽车动能与保证安全的制动距离和汽车行驶稳定性之间取得平衡，是制动能量回收系统需要解决的难题之一。制动能量回收系统与汽车防抱死制动系统的结合可以完美地解决这一难题。

6. 先进车辆控制技术

传统汽车的车辆动力学控制系统与混合动力控制系统及制动能量回收系统的结合，将是混合动力汽车控制技术的下一个研究热点。混合动力汽车的再生制动系统与传统汽车的防抱死制动系统的结合，在国外已经得到了较好的解决，而国内尚无真正的解决方案。另外，随着对混合动力汽车研究的深入，传统汽车的驱动控制系统、汽车稳定性控制系统等与混合动力汽车的能量管理系统及动力控制系统的结合，将会得到越来越广泛的关注。传统汽车的控制技术与现代电动汽车控制技术的融汇集成，将使未来的混合动力汽车更加节能、舒适和安全。

6.2 混合动力汽车动力系统设计



【混合动力电动汽车匹配】

在混合动力汽车中，动力源部件的协调工作对整车的性能影响很大，尤其对混联式混合动力电动车。由于动力分配装置的存在，其对动力源部件的匹配及合理控制要求更高。

混合动力汽车获得高的燃油经济性主要通过以下原则来实现。

(1) 将较小型发动机安装在汽车上并使发动机在较高负荷下工作(获取较高的效率)。

(2) 将制动时产生的能量转换为电能用于汽车加速或为其提供动力。

(3) 采用高效率的电动机将汽车从静止状态起动起来。

下面以某汽车为例，保持原车的外形参数不变，只对其动力系统进行重新设计，动力系统采用混联式结构。

6.2.1 发动机

发动机由于自身特性的显著非线性，其真实模型相当复杂，通常采用高阶多项式近似方程进行模型描述，但多项式的阶数过高又不便于模拟计算，因此直接引用这些数学模型并不合适。为了解决这个问题，ADVISOR 采用了实验数据建模法，即通过对大量的实验数据(如发动机的万有特性图和排放特性数据)的分析、处理，获得描述发动机工作特性的近似方程。此处采用上面的几条原则对发动机功率进行设计。

发动机功率的选择对混联式混合动力传动系统的设计至关重要。发动机功率偏大，汽车燃油经济性和排放性能就差；发动机功率偏小，后备功率就小，电动机只有提供更多的驱动功率，才能满足汽车一定的行驶性能要求，这势必引起电动机功率和电池组容量取值的增大和汽车成本的增加。另外，电池组数目增多，在汽车上布置困难，汽车质量增加，仅依靠发动机的富裕功率难以维持电池组的额定电量，限制了汽车的续驶里程。

因此，设计出能满足原车动力性能要求的小功率发动机是降低油耗和尾气排放的关键。同普通动力传动系统相比，混合动力汽车发动机可限制在某一特定区域工作，特定区域的选择可考虑使发动机燃油消耗最小和尾气污染物排放最少，即考虑发动机燃油消耗率较小的高负荷率区。考虑发动机单独驱动的情况，汽车行驶时的功率方程为

$$P_e=\frac{1}{\eta_T}\left(\frac{Gfu_a}{3600}+\frac{Giu_a}{3600}+\frac{C_DAu_a^3}{76140}+\frac{\delta mu_a}{3600}\frac{du}{dt}\right) \tag{6-6}$$

式中，P_e 为发动机输出功率；η_T 为传动系统效率；G 为汽车重量；f 为汽车滚动阻力系数；i 为汽车行驶路面的坡度；u_a 为汽车行驶速度；C_D 为空气阻力系数；A 为迎风面积；δ 为旋转质量换算系数；m 为汽车质量。

根据式(6-6)，得到汽车在匀速行驶时各种坡度下的行驶车速与所需功率的关系曲线，如图 6.14 所示。

原发动机的最大功率为 92kW，最高转速为 7500r/min。从图 6.14 中可以看出，汽车达到最高车速 175km/h 时，发动机只需发出约 67kW 的功率。由汽车的功率平衡图可以知道，当汽车在城市间高速路上以常规速度(即速度为 80～120km/h)行驶时，发动机具有很大的后备功率，即发动机的负荷率较低，燃油经济性较差。汽车在满载的情况下，在 6%的坡度上以 90km/h 的速度行驶时，发动机只需发出约 44kW 的功率。然而在混联式混合动力系统中，由于电动机的存在，发动机可减小用于加速和爬坡的后备功率，使发动机经常工作在较高的负荷率下以提高燃油经济性。当发动机发出 55kW 的功率时，汽车在水平路面上行驶车速可达到 164km/h，而汽车在城市间的高速路上行驶时车速一般不会超过 140km/h，因此，设计发动机的最大功率为 55kW，这样既可以降低发动机的排量，又可以提高发动机的负荷率，有利于排放和燃油经济性。同时，发动机的最高转速设计也很

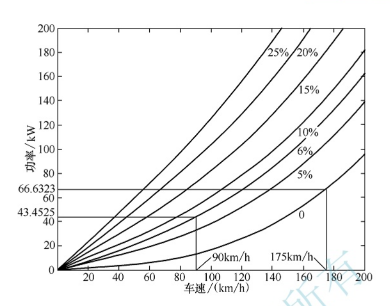


图 6.14 汽车匀速行驶时各种坡度下的行驶车速与所需功率的关系曲线

关键。发动机最高转速过高时会加剧部件之间的磨损，降低发动机效率；而发动机最高转速过低时可能造成最高车速降低。考虑到部件磨损和最高车速的合理性，通过对现有中小功率发动机进行分析，设计发动机最高转速为6000r/min。

6.2.2 电动机

电动机在混联式混合动力汽车上起着很重要的作用。它既可以作为起动电动机使用，又可以起到串联和并联结构中电动机的作用，还可以在制动时作为发电机回收制动能量。因此，在混联式混合动力汽车上对以电动和发电模式下工作的电动机有更高的要求：恒转矩、恒功率(弱磁控制)工作，高效率的大功率输出，接近双倍功率的过载量(出现于汽车再生制动时的发电模式下，此时电动机转速变化范围在几转到上万转)。混合动力汽车上使用的电动机有直流电动机、永磁无刷电动机、感应电动机和开关磁阻电动机等。研究开发体积小、质量轻、工作可靠及动态响应好的电动机，对进一步提高混合动力汽车的动力性和燃油经济性极为重要。

1. 逆变器/电动机控制策略

在提出电动机工作特性和设计参数之间的关系之前，首先要说明逆变器/电动机的控制策略。它是牵引驱动系统中涉及电动机选型和设计在内的大多数因素的基本依据。电动机在最大输出时的逆变器/电动机控制策略如图6.15所示。

电动机的转矩-速度曲线给出了牵引驱动期望的宽调速范围轮廓，具有三个特征工作区，即恒转矩区、恒功率区和转差率限制区。

恒转矩区是从零转速到基速。在这个区域里，逆变器在PWM模式下工作，为电动机提供变化的频率和变化的电压。为了保持恒磁通，交流电压要随速度(频率)的变化而调整，因此，交流电压基本上随速度(频率)成正比增长。转子中感应电压频率(睡眠频率)保持恒定，并且交流电流几乎不变，这就产生了几乎保持恒定的转矩。当然，由图6.15可知，电动机的输出功率与速度成正比，所以功率随速度上升到基速。这种控制方法在交流电压达到逆变器可提供的最大值之前是可行的。恒转矩区电动机的工作特性与单独励磁的

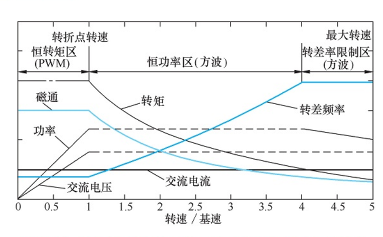


图 6.15 电动机在最大输出时的逆变器/电动机控制策略

直流电动机相同。此后，电动机控制从恒转矩区步入恒功率区。

恒功率区是从基速到最大速度（恒功率区结束时刻的速度）。在这个区域里，逆变器为电动机提供变化的频率，而交流电压保持不变。因此，电磁转矩与速度平方成反比减小，电动机输出功率几乎恒定。

转差率限制区是从恒功率区结束时刻到最大转速。在这个区域里，任何进一步提高速度都必须保证转差频率恒定，交流电压和磁通密度的变化与恒功率区一致，电磁转矩随速度平方成反比减小，同时电动机功率也减小。

转矩可以通过带有两挡或多挡变速器的齿轮箱传递到车轮上。当齿轮脱离低速齿轮(大传动比)而与高速齿轮(小传动比)啮合时，电动机在恒功率区易于操纵。汽车在市区行驶时的最大速度(如 80km/h)，仅需通过脚踏板调节基本挡就可以实现。满足混合动力汽车驱动要求最好的解决办法是采用无级变速器。

2. 电动机功率设计

通常，适用于电动汽车使用的电动机外特性如下：在额定转速以下，电动机以恒转矩模式工作；在额定转速以上，以恒功率模式工作。相应参数选取包括电动机额定功率、电动机额定转速与电动机最高转速。

依据控制策略，电动机起动功率应满足汽车的最大爬坡度和加速时间要求。由于在确定发动机功率时已考虑了因发动机按照最小油耗曲线工作而需增加的功率裕量，为简单起见，可设汽车在混合驱动工况时，以最大速比原地起步加速或爬坡，节气门全开，当发动机转速达到最高功率对应的转速时，控制发动机保持在该点工作，并控制电动机保持在该转速下工作，调整发电机转速及速比来提高车速。

由最大爬坡度要求，得

$$F_{\mathrm{tmax}}-mgf\cos\alpha_{\max}-mg\sin\alpha_{\max}-\frac{C_{\mathrm{d}}Au_{\mathrm{f}}^{2}}{21.15}=0 \tag{6-7}$$

由原地起步加速时间要求，得

$$t-\frac{1}{3.6}\int_{0}^{u}\frac{\delta m}{(F_{\mathrm{t}}-F_{\mathrm{f}}-F_{\mathrm{w}})}\mathrm{d}u=0 \tag{6-8}$$

式中，F_{tmax}为最大驱动力；$\alpha_{\max}$为最大爬坡角；u_{f}为最大驱动力所对应的车速；u为车速；t为$0\sim u$的加速时间；δ为旋转质量换算系数；F_{t}、F_{f}、F_{w}分别为驱动力、滚动阻力和空

气阻力。

混合驱动的驱动力 F_t 和 F_{tmax} 都是电动机起动功率 P_m 的函数。使用 MatLab 中的 fzero 函数求解，得到满足加速时间或最大爬坡度要求的最小电动机起动功率，取两者之中较大值作为电动机起动功率，数值整数化后为 40kW。

电动机的最高转速对传动系统的尺寸、电动机的额定转矩都有影响。电动机的最高转速与额定转速的比值，称为电动机的扩大恒功率系数 β。在电动机功率一定时，随 β 值的增大，转速降低；对应的电动机额定功率越高，对电动机的支撑要求越高。此外，高转矩需较大的电动机电流，其增大了功率变换器的尺寸和损耗，但大 β 又是汽车起步加速和稳定行驶所必需的，所以电动机传动轴额定转矩的减少只能通过选用高速电动机来解决。但这又影响传动比，所以必须协调考虑电动机的最高转速和传动系统的尺寸。另外，增大 β 值也会使驱动轴转矩和齿轮应力增大，选择时还要考虑 β 值和齿轮应力。β 一般选为4～6。此处对比原有的交流感应电动机，考虑上面因素的影响，选取电动机最高转速为 9000r/min，扩大恒功率区系数 $\beta=4.5$。

对仿真结果分析可知，当发动机、电动机与电池功率不变，并且整车总质量不变时，改变电动机的功率对整车的动力性与经济性影响非常微小，因此本车采用小型轻量高效的交流永磁同步电动机，功率为 15kW，质量为 33kg。

6.2.3 储能装置

目前，电化学电池仍是多源混合驱动的一个基本组成元素。无论是在串联、并联还是混联的混合传动结构中，电化学电池都被用作辅助能源。大多数混合动力汽车在再生制动时就像通常的电动汽车一样：牵引电动机工作于发电模式，汽车的动能通过牵引电动机传递给电池。

混合动力汽车上的电池，其使用状况不同于电动汽车，在工作中电池处于非周期性的充放电循环中，故要求电池的充放电速率和效率高。因此，混合动力汽车中使用的电池不仅需要高能量密度，而且需要高功率密度。研发高性能、低成本、寿命长的电池，仍然是发展混合动力汽车的关键问题之一。

1. 电池通用模型

电池能量模型建立的基础是电池的等效电路图。其等效电路如图 6.16 所示。图中 R_{el} 为电解液电阻；R_e 为电极电阻；U_a 为电池电压；i_a 为电池负载电流；E 为电池端电压。

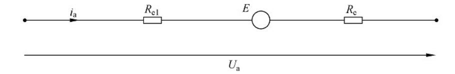


图 6.16 电池的等效电路

由电池等效电路，可计算出电池两端的电压降 U_a。电压与电池的工作状态有关，计算如下。

电池放电时 $$U_a=E-i_aR'_w \tag{6-9}$$

电池充电时 $$U_a=E-i_aR''_w \tag{6-10}$$

根据图 6.16，可得电池的通用模型如下。

电池放电时

$$Q_u(i_a, t, \tau) = c_\tau(\tau)\eta_A(i_a, \tau)Q_{\tau n} - \int_0^{t_i} i_a(t)dt \tag{6-11}$$

$$Q'_u(i_a, t, \tau) = Q_u(i_a, t, \tau) - \int_i^{t_{i+m}} \eta_A(i_a, \tau)^{-1} i_a(t)dt \tag{6-12}$$

$$k = c_\tau(\tau)\eta_A(i_a, \tau) - Q_{\tau n}^{-1}\int_0^{t_i} i_a(t)dt \tag{6-13}$$

$$k' = k - Q_{\tau n}^{-1}\int_i^{t_{i+m}} \eta_A(i_a, \tau)^{-1} i_a(t)dt \tag{6-14}$$

$$\eta_A(i_a, \tau) = \left[\frac{i_a(t)}{I_n}\right]^{-\beta(\tau)} \tag{6-15}$$

$$R'_w(i_a, t, \tau, k') = b\frac{E(k')}{i_a(t)} + l\left[k - Q_{\tau n}^{-1}\int_i^{t_{i+m}} \eta_A(i_a, \tau)^{-1} i_a(t)dt\right]^{-1} \tag{6-16}$$

$$u(t, k') = E(k') - i_a(t)R'_w(i_a, t, \tau, k') \tag{6-17}$$

$$\eta_{Ad}(t) = \left[\sum_{i=1}^{m} \frac{E(k')_i}{u(t, k')_i}\right]^{-1} \tag{6-18}$$

电池充电时

$$k'' = k' + Q_{\tau n}^{-1}\int_i^{t_{i+m}} i_a(t)dt \tag{6-19}$$

$$\eta_A(i_a, \tau) = 0 \tag{6-20}$$

$$R''_w(i_a, t, \tau, k'') = b\frac{E(k'')}{i_a(t)} + l\left[k' + Q_{\tau n}^{-1}\int_i^{t_{i+m}} i_a(t)dt\right]^{-1} \tag{6-21}$$

$$u(t, k'') = E(k'') - i_a(t)R''_w(i_a, t, \tau, k'') \tag{6-22}$$

$$\eta_{Ac}(t) = \left[\sum_{i=1}^{m} \frac{E(k'')_i}{u(t, k'')_i}\right]^{-1} \tag{6-23}$$

电池不工作时

$$i_a = 0 \tag{6-24}$$

$$\eta_A(i_a, \tau) = 0 \tag{6-25}$$

$$\eta_{Ad}(t) = 0 \tag{6-26}$$

$$\eta_{Ac}(t) = 0 \tag{6-27}$$

$$u(t, k) = E_{min} + \Delta U_k \tag{6-28}$$

式中，R'_w 为电池放电内阻；R''_w 为电池充电内阻；i_a 为电池负载电流；t 为时间；τ 为温度；Q_u 为电池瞬时可用容量；c_τ 为额定容量的温度系数；η_A 为电池功率可利用系数；$Q_{\tau n}$ 为电池的额定容量；k 为电池 SOC 值；I_n 为电池额定电流；β 为根据 Peukert 方程确定的常数；E 为电池电动势瞬态值；u 为电池端电压；η_{Ad} 为电池瞬时放电效率；η_{Ac} 为电池瞬时充电效率；l 为内阻计算系数；b 为电池电动势变化系数；E_{min} 为电池最小电动势；ΔU_k 为电池电压变化量。

2. 电池功率设计

上面所述电池的通用模型均是时间的函数，具有动态特性，从而可以计算出电池或使用电池的整个传动系统的许多物理量的时间均值。

然而，具体的汽车行驶功率的变化与电池的瞬时负载电流、电压和内阻的变化，特别是与电池中的能量变化密切相关。

对于给定类型的电池，使用其通用模型可计算出电池各种荷电状态下的指标值。

内阻为

$$R_w(t,k)=b(k)\frac{E(k)}{i_a(t)}+\frac{l(k)}{k(t)} \quad k(t)\in[0,1] \tag{6-29}$$

电动势为

$$E(t)=E(k) \tag{6-30}$$

在求解式(6－29)或式(6－30)所组成的方程组之前，要首先确定下列函数，即

$$\begin{aligned} b(t)&=b(k)\\ l(t)&=l(k) \end{aligned} \tag{6-31}$$

不可能采用试验的方法直接测量上面提到的各个量，也不可能在实车上实时记录各个量的值(通过测量监控)，只能通过以电池电流和电压为输入的电池模型来估算。确定电池动态的荷电状态值 k，对于混合电动车的设计和保养来说是必要的。

在区间 $k\in\sum_{n=1}^{m}[k_{n-1},k_n]\Rightarrow k\in(0,1)$ 里，$k_n=k_{n-1}+\Delta k$，则按照迭代的方法获得的 $E(k_n)$，$b(k_n)$，$l(k_n)$是一系列的离散点。对不同的 Δk，经过一系列的仿真分析，得到结论：取 $\Delta k=0.01$ 就可以足够准确地反映电池内阻的变化趋势。

采用迭代近似法进行计算，可以得到的电池电动势 E、系数 b 和 l 的特性曲线。在满足一定精度的情况下，可以用多项式来拟合电池的特性。

为了保证电池的寿命，通常要求电池放电时的放电深度不大于 0.75。在电池的放电过程中，希望电池的放电电压保持恒定，为电动机提供一个稳定的工作条件。而电池的电压是荷电状态的函数，混合动力汽车上电池理想的工作区是 SOC＝0.4～0.8。

电池的容量及功率的大小会影响整车的燃油经济性。增大电池的功率会使发动机的负担降低，改善经济性和排放性能，但是增大电池功率的同时会使整车的质量大大增加，又会降低动力性、经济性和排放性。在混联式驱动系统中，电池和发电机可以同时供给电动机能量，暂时忽略能量流动中的损失，理论上使得电池组功率与发电机功率之和等于电动机功率。因此，设计电池组的功率为 25kW。

3. 电池仿真模型

由于电池在充放电时伴随着复杂的电化学反应，化学反应产生的热量导致电池温度发生变化。因此，电池的电化学特性是与各种随机变量相关的非线性函数。实际上，电化学电池动态模型的建立有两方面：一方面要从分析它的内在机理出发；另一方面还要借助实验测试来拟合非线性变量之间的关系。建模的基础是确定电池的电动势 E、内阻 R_{int} 的特性函数。特性函数的确定是基于对 R_{int} 随电池 SOC(SOC∈[0，1])变化关系的测试结果。这种建模方法建立的电池模型通常被称为内阻模型。蓄电池的输出功率受等效电路所能输出的最大功率或电动机功率控制器所能接受的最大功率的影响。并且约定，输出功率为正时，电池处于放电状态；输出功率为负时，电池处于充电状态。电池能量模型可以通过电池的等效电路来描述。

(1) 电池开路电压和内阻计算模块

这个模块根据给定的当前的 SOC 值和电池的功率需求来计算单个电池的开路电压和

内阻。模块首先根据 SOC 值和电池的温度，采用插值法，分别求出开路电压和充电及放电时的内阻。得到的单个电池的电压与电池块数的乘积为总的开路电压输出值，单个电池的充电或放电内阻乘以电池块数并经过转换控制器得到合适的内阻。

(2) 功率限制模块

这个模块可以用来防止计算电池负载电流的功率超出 SOC 值、等效电路的参数值和电机控制器允许最小电压等的限制。

模型顶部是电池 SOC 值的判断，如果电池电量耗尽，则控制电池的输出功率为零。电池最大输出功率受到三个参数的限制：电池组总电压、电动机功率控制器允许最小电压及电池组最小可用电压。电池工作电压不能低于电动机最小驱动电压和电池最低电压。如果这两个极限都没有超越，同时电压也等于开路电压的二分之一，那么此时将输出最大功率。

(3) 电池负载电流计算模块

电池负载电流计算模块将根据电功率的定义和基尔霍夫电压定律求解关于负载电流的二次方程，即 $R_{int}I^2-V_{oc}I+P_{bus}=0$。

模块上部是根据基尔霍夫电压定律计算负载电流。在充电过程中电压不能超出最大值，最大充电电流由式 $I=(V_{oc}-V_{max})/R$ 得到。得到的负载电流与开路总电压和电池内阻结合，同样由基尔霍夫电压定律计算得到负载电压。

(4) SOC 计算模块

通过计算，可以得出 SOC 的近似值，从而可以确定电池的剩余电量。这里涉及的库仑定律和电池最大容量均是电池温度的函数。

仿真开始时，通过计算所有放电电流和充电电流的总和，确定电池总电量的变化。初始 SOC 被置为非零状态，电池变化的电量与初始的电量求和得到剩余电量，剩余电量与电池最大容量的比值即电池的 SOC 值。

(5) 电池散热模块

电池散热模块可以预报汽车在行驶过程中和电池充电期间电池的平均温度和表面温度。

电池采用自然风冷却方式。该散热方式有辐射和传导两种形式。由电池内阻产生的热量和电池表面热量计算出电池的温度，将其反馈到自动调温器中，如果电池温度超过设定温度就使冷却风开启，由此又可以得到电池表面的热量和空气的温度。由电池表面的热量可以得到空气的热量。由反馈控制可以使电池冷却。

(6) 电池总成模型

根据上述建模方法，电池模型根据动力总线的功率需求计算出电池 SOC 的近似值，并输出可用功率。功率损失按内阻损失加上库仑效率定律确定的功率损失计算。组合上面的主要模块生成电池的总成模型，如图 6.17 所示。

等效电路将电池电动势和内阻当作串联电路上两个电路元件的电路参数。电池所能够容纳的充电量被看作常数，并受到电池最小开路电压的限制。电池放电之后需要重新补充的电量受到库仑定律的影响，最大充电量受到电池最大开路电压的限制。当电池完全被当作一个已知内阻的电压源时，与之相连接的部件，如发动机或电动机，就可看作电源或耗能元件。电池的输出功率受等效电路所能输出的最大功率或电动机功率控制器所能接受的最大功率的影响。

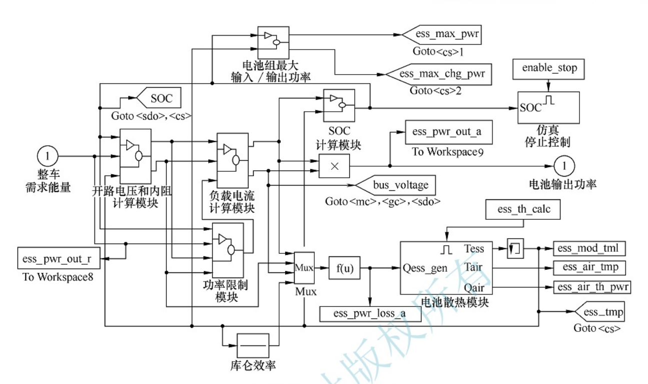


图 6.17 电池总成模型

6.2.4 动力分配装置

在混联式混合动力传动结构中，用于实现能量分流和综合的动力分配装置是一个行星齿轮机构，其中行星架与发动机的输出轴相连，齿圈与电动机的转轴相连，同时也与输出齿轮相连，而太阳轮轴发出的动力驱动发电机发电，中间与离合器相连，必要时锁死太阳轮，使行星齿轮机构以一定的传动比工作。发电机的转子刚性连接在发动机的输出轴上。动力分配装置如图 6.18 所示。

通过对行星机构的变速比和受力分析可以得到如下方程组。

$$\omega_1 + k_P\omega_2 - (1+k_P)\omega_3 = 0$$
$$T_3 = \frac{(1+k_P)}{\eta_S}T_1 = \frac{(1+k_P)}{\eta_R k_P}T_2 \quad (6-32)$$

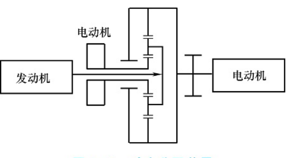


图 6.18 动力分配装置

式中，k_P 为齿数比，$k_P = z_2/z_1$，z_1 为太阳轮齿数，z_2 为齿圈齿数；η_S为由太阳轮到行星架的效率；η_R为由齿圈到行星架的效率；T_1、T_2、T_3 分别为太阳轮、齿圈和行星架的转矩；ω_1、ω_2、ω_3分别为太阳轮、齿圈和行星架的角速度。

作用在驱动轮上的转矩 T_t 是由发动机产生的转矩经过动力分配装置后传至车轮上的，因此驱动力为

$$F_t = \frac{T_{tq} i_0 \eta_T}{r} \quad (6-33)$$

式中，T_{tq}为作用在齿圈上的总转矩；i_0 为主减速器速比；η_T为传动系统效率；r 为车轮半径。

由式(6－32)和式(6－33)可知，k_P 和 i_0 的取值对整车的动力性有很大的影响。与原车的动力性进行比较，改型后的汽车最高车速不小于165km/h，0～100km/h的加速时间不大于13.5s。此处的动力分配机构作为变速器使用，与原车的变速器传动比进行比较，根据前面动力源的设计与此处动力性的约束设计，可设计 $k_P=108:30$，$i_0=5.94$。

混联式混合动力系统的行星齿轮机构可以充分满足汽车用任何一种独立驱动模式或任何一种混合驱动模式，平稳有序地运转来带动汽车行驶，不会发生任何的运动干扰。使用多能源动力总成控制模块，随机地转换汽车的驱动模式，可使发动机和驱动电动机始终保持最佳效率状态。

6.2.5 整车仿真模型

分别对混联式混合动力汽车的各个重要模块进行数学建模与仿真建模，把各个仿真模块封装起来，加入混联式混合动力汽车的整车模型中，并进行连接，得到其总体框架，如图6.19所示。

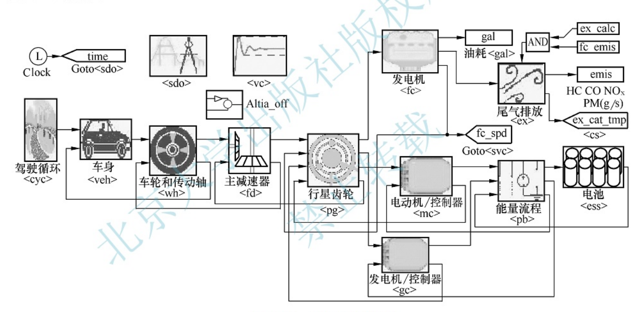


图6.19 整车仿真模型

6.2.6 控制策略

混联式混合动力汽车有以下几种控制方法。①恒工作点控制方法。由于发动机的转速可以通过调节发电机的转速来调整，发动机的转矩和转速都可以不受制于汽车复杂的工况，驱动系统的控制策略与串联式混合动力汽车相似。②总功率损失最小化原则。功率的分配可以根据总功率损失最小来定义，包括所有零部件的总效率损失。③维持电池的SOC值。在这种方法中，当汽车需要较大的加速时，发动机和电动机同时驱动车轮。当需要比较小的驱动功率时，发动机被关闭，电动机输出驱动功率；当所需功率比较适中时，发动机驱动车轮并通过发电机来给电池充电，充电功率根据SOC值的大小而不同。

混联式混合动力系统通过行星齿轮装置实现控制方法的可操作性。此处采用了以设定

车速 V_{model} 和电池 SOC 值为控制信号的控制方法。通过动力分配装置的执行，灵活地选用最优的能量流动途径，其工作模式及能量流动如图 6.20 所示。

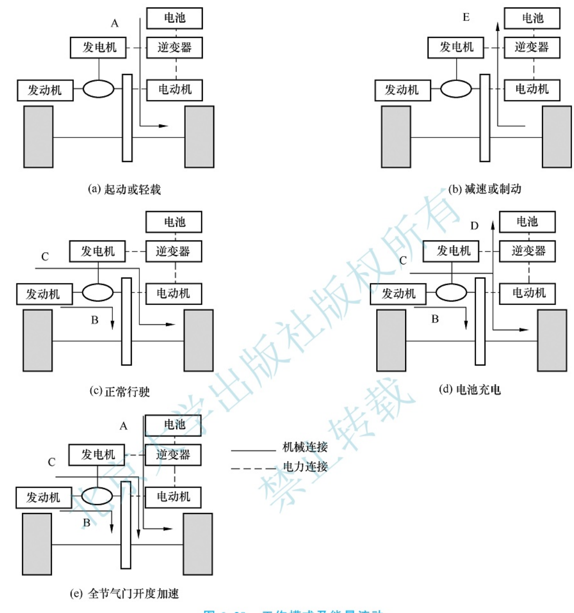


图 6.20 工作模式及能量流动

图 6.20 中字母所代表的能量流动方向如下。

A：电池→电动机→车轮。

B：发动机→车轮。

C：发动机→发电机→电动机→车轮。

D：发动机→发电机→电池。

E：车轮→电动机→电池。

起动或轻载工况：由于发动机不能有效地工作，因此关闭发动机，而由电动机单独驱动汽车（A）。

减速或制动工况：电动机以发电模式工作，实现再生制动(E)。

正常行驶工况：发动机输出功率的一部分用于直接驱动汽车，剩余部分经发电机转化

为电能后向电动机供电(B、C)。

电池充电工况：当车载电池组电量偏低时，即使已经停车，发动机也应继续工作并对电池进行补充充电(B、C、D)。

全节气门开度加速工况：由电动机和发电机共同驱动汽车(A、B、C)。

6.2.7 仿真实例

在汽车这样一个非常复杂的非线性动态系统中，单纯地建立数学模型来对设计变量进行优化是很不现实的，很多所谓的优化匹配都是使用动力性指标作为约束简单计算得来的，得到的数据只是建立在理论分析基础上的，并没有达到真正意义上的优化。可以使用仿真软件 ADVISOR 与数值计算结合进行优化，效果显著高于简单的计算选取。在前面合理设计的数据基础上会使所需测试的数据大大减少，加快优化速度。

由理论分析可知，在其他条件不变，只有三大动力元件功率变化(相应质量随着变化)的情况下，对于整车的动力性和燃油经济性有如下的函数关系。

0～100km/h 的加速时间 t_{100} 为

$$t_{100}=F_1(P_e, P_m, P_b) \tag{6-34}$$

最大爬坡度 i_{max} 为

$$i_{max}=F_2(P_e, P_m, P_b) \tag{6-35}$$

燃油消耗量 g 为

$$g=G(P_e, P_m, P_b) \tag{6-36}$$

HC 排放量 g_H 为

$$g_H=G_H(P_e, P_m, P_b) \tag{6-37}$$

CO 排放量 g_C 为

$$g_C=G_C(P_e, P_m, P_b) \tag{6-38}$$

NO_x 排放量 g_N 为

$$g_N=G_N(P_e, P_m, P_b) \tag{6-39}$$

式中，P_e 为发动机功率；P_m 为电动机功率；P_b 为电池组功率。

上面的函数是复杂的多变量非线性函数，很难得到其具体的表达式。这就需要使用数值分析的方法把仿真测试得到的有限个离散数据进行三维插值，可以得到需要范围内的任何数值。由于在此处的实际问题中功率的数值一般取为整数，故使用整数点插值即可。对各种性能的重要性进行加权分析，使用 MatLab 中的 min 函数容易得到插值数据中的最小值，同时找出对应于最小值的设计变量值作为最终的设计结果。保持整车的外形尺寸不变，使用仿真模型测试数据，对测试数据进行插值计算并加权处理后进行优化，提取得到的设计结果：发动机功率为 40kW，电池功率为 35kW，电动机功率为 48kW。

得到动力源优化分配的结果之后，再次使用仿真软件对整车的性能进行仿真分析，在 UDDS 循环工况下，分别对使用传统设计方法和优化设计方法得到的整车性能进行仿真分析。汽车性能数据见表 6-4。

表6-4 汽车性能数据

整车性能		原车	传统设计	优化设计
动力性	最高车速/(km/h)	>170	>170	>170
	0～100km/h的加速时间/s	13.5	12.4	13
	60～120km/h的加速时间/s	<12	10.6	11.4
	最大爬坡度/(%)	25	>25	>25
经济性	多工况油耗/(L/100km)	7.5	5.1	4.4
排放性	NO_x/(g/km)	0.53	0.138	0.124
	CO/(g/km)	3.16	1.069	0.825
	HC/(g/km)	0.6	0.236	0.18

可以看出，改装后的汽车最高车速与原车的最高车速基本相等，加速能力和爬坡能力稍稍好于原车，重要的是油耗和排放明显好于原车。由这些数据可以得到如下结论：在没有降低原车动力性的条件下，经改装的混联式混合动力汽车燃油经济性与排放性能都有明显的改善，达到了节能和环保的目的。

同时发现，采用传统设计方法改装的车在动力性上稍好于采用优化方法改装的车，但在经济性上后者要远远好于前者。在车的动力性没有降低的情况下，盲目地提高动力性是没有必要的，这就说明了传统的设计方法得到的结果并不是最优解，优化出来的设计值才能使整车的综合性能达到最佳。

6.3 混合动力汽车制动能量回收系统



【制动能量回收模式】

制动能量回收系统是混合动力汽车的重要组成部分之一，又称再生制动系统，是指汽车在制动或下坡时将储存于车身的势能和动能，通过电动机转化为电能，并储存于储能装置中的过程。

制动能量回收系统的结构与原理如图6.21所示。该系统由驱动轮、主减速器、变速器、电动机、AC/DC转换器、DC/DC转换器、能量储存系统(电池)及控制器等组成。

汽车在制动或滑行过程中，根据驾驶人的制动意图，由控制器计算得到汽车需要的总制动力。再根据一定的制动力分配控制策略得到电动机应该提供的电动机再生制动力。电机控制器计算需要的电动机电枢中的制动电流，通过一定的控制方法使电动机跟踪需要的制动电流，从而较准确地提供再生制动力矩，在电动机的电枢中产生的电流经AC/DC转换器整流再经DC/DC转换器反充到储能装置中保存起来。

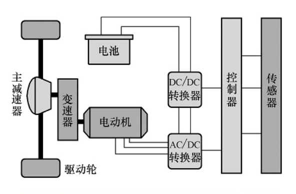


图6.21 制动能量回收系统的结构与原理

6.3.1 混合动力汽车制动力分配控制策略

混合动力汽车制动力由前、后轮制动器提供的制动力和电动机提供的再生制动力三部分组成，其中再生制动力只作用在驱动轮上。其采用三种制动力分配控制策略，即前、后轮制动力理想分配时及比例分配时的控制策略、最优能量回收控制策略。

1. 前、后轮制动力理想分配时的控制策略

汽车制动时，如果前、后轮制动力理想分配，则前、后轮同时抱死，对附着条件的利用、制动时汽车的方向稳定性均有利。图 6.22 所示为电液制动系统原理。此系统可以实现制动力的理想分配。

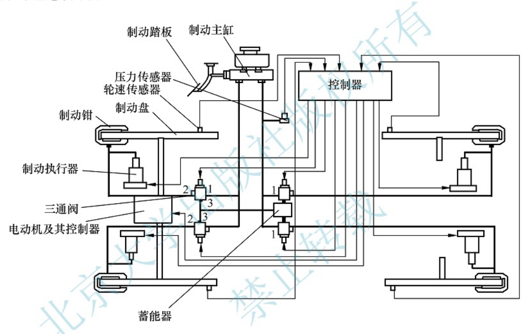


图 6.22 电液制动系统原理

当驾驶人踩制动踏板时，由压力传感器得到制动力信息，在控制器中经过计算分别得到四个轮上的制动器制动力和电动机的再生制动力矩，并将这些指令传送到各轮制动执行器和电机控制器，由一定的控制方法，使得实际的制动力按需要的制动力变化。此时三通阀 1 口与 3 口相通，液体压力储存到蓄能器中，同时得到制动踏板的脚感。当控制器检测到车轮的制动执行器出现故障时，控制器发出控制信号，使该车轮对应的三通阀 1 口与 2 口相通，该车轮同样能得到制动的效果，保证了制动系统的可靠性。

图 6.23 所示为前、后轮制动力理想分配时的控制策略。图中的最小后轮制动力曲线是根据我国行业标准提出的要求。ECE 法规规定，对于附着系数 $\varphi=0.2\sim0.8$ 的汽车，要求制动强度 $z\geqslant0.1+0.85(\varphi-0.2)$。

图 6.23 中横轴为前轴上的总制动力即前轮制动力，纵轴为后轴上的总制动力即后轮制动力。当制动减速度较小时，仅再生制动系统工作；当制动减速度增大时，前后轴制动力将被控制在理想制动力分配曲线上。其中前轴制动力等于再生制动力和机械制动力总和。当控制系统得到驾驶人的减速度要求时，前轴制动力将根据制动电动机的特性和车载能量储存系统的 SOC 值决定驱动轴制动力是由制动能量回收系统单独提供，还是由机械

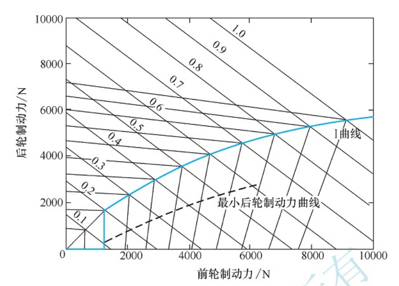


图 6.23 前、后轮制动力理想分配时的控制策略

制动系统和制动能量回收系统共同提供。

2. 前、后轮制动力比例分配时的控制策略

对轿车来说，空载和满载的 I 曲线很接近，只用比例阀就可以满足制动稳定性和附着系数利用率高的要求。如何才能在对原有制动系统进行小的改动情况下，从驱动轮分离出再生制动力呢？可以采用另外一种分配控制策略——并行制动。并行制动是指再生制动与机械制动以固定的关系分享驱动轮制动力。也就是说，驱动轮制动力等于再生制动力与机械制动力的总和。并行制动控制策略如图 6.24 所示。

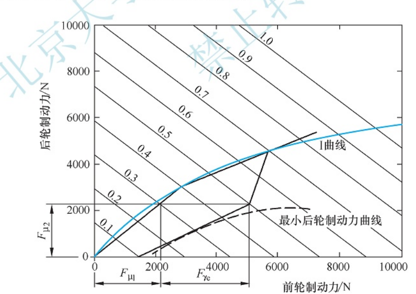


图 6.24 并行制动控制策略

$F_{\mu1}$、$F_{\mu2}$—前、后轮制动力；$F_{\gamma e}$—再生制动力

当需要的制动力较小时，由制动能量回收系统单独作用，其中包括对发动机制动的模拟；当需要的制动增大时，再生制动力所占的比例逐渐减小，机械制动系统开始起作用；当总制动力大于一定值时意味着这是一个紧急制动，再生制动力减小到零，机械制动系统提供所有的制动力；当所需的制动力在两者之间时，制动能量回收系统与机械制

动系统共同作用。

3. 最优能量回收控制策略

最优能量回收控制策略是指当总制动力小于此时能提供的最大再生制动力时，仅由制动能量回收系统起作用；当总制动力大于此时能提供的最大再生制动力时，总制动力减去最大再生制动力是应该提供的机械制动力，剩余的须提供的机械制动力将分配为前轮机械制动力和后轮机械制动力。前、后轮机械制动力的分配按照尽量使总的前、后轮制动力分配接近理想制动力曲线。

图 6.25 所示为最优能量回收控制策略。从图中可以看出，只要满足地面附着条件，前、后轴的制动力即前、后轮制动力可以在一定范围内变化。其中，地面附着系数 0.7，制动强度 0.5 是假设值。在这种情况下，应该优先使用再生制动。

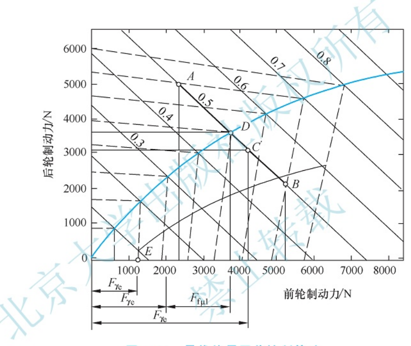


图 6.25　最优能量回收控制策略

$F_{\gamma e}$—再生制动力；$F_{f\mu 1}$—前轮摩擦制动力

最优能量回收控制策略存在以下几种情况。

(1) 如果现有的最大再生制动力在 AB 线段，并且在横坐标的投影范围内，如图 6.25 中点 C 在横坐标的投影，那么作用在前轴上的制动力应该由电动机单独提供，控制器应该将后轮制动力控制在点 C 所对应的点上。

(2) 如果现有的再生制动力在 A 点横坐标左边，再生制动力应该控制在电动机的最大制动力处，并且控制器应该控制前、后轮摩擦制动力达到图中 D 点。

(3) 在制动力需求很小的情况下，如果再生制动力自己可以满足要求，则只用再生制动力。

从硬件组成方面来考虑，前、后轮制动力理想分配时的控制策略和最优控制策略都需要一套专门的制动力控制系统来控制前、后轮的摩擦制动力，系统复杂，而并行制动控制策略可以在对原有制动系统做很小改动的情况下，通过控制电动机的电流来控制再生制动力，从而控制制动能量回收的效果。

6.3.2 混合动力汽车制动力分配控制策略的实现

下面以并联式混合动力汽车为例，介绍如何实现制动力分配控制策略。

ADVISOR软件设计了汽车、发动机(即燃料转换器)、电池系统(即能源储存系统)和电动机系统等多个部件的仿真模型。图6.26所示为并联式混合动力汽车的仿真模型。每个仿真模型都有各自的部件数据文件，位于\ADVISOR 2002 \ data目录下的各子目录中。

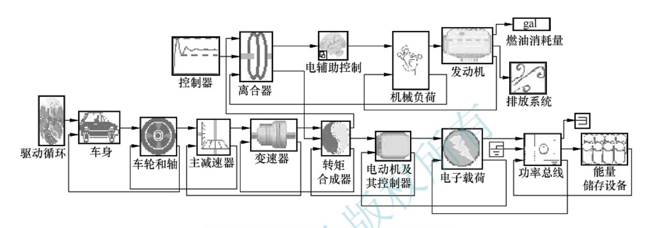


图6.26 并联式混合动力汽车的仿真模型

1. ADVISOR中的制动力分配模型

ADVISOR是集后向仿真与前向仿真于一体的软件。后向仿真程序通常不包括驾驶人行为模型，并且只能通过迭代预测最大极限性能。前向仿真包括了驾驶人模型，可以试图调整喉管和制动命令来跟踪预定的行驶工况。前向仿真程序擅长最大极限性能的计算，但是计算速度通常较慢。

2. 理想制动力分配策略实现

理想制动力分配时前轮和后轮的总制动力按照I曲线分配，而驱动轮上的摩擦制动力和再生制动力分配则是按照这样一个原则：当驱动轮上总的制动力小于或等于此时能够提供的最大再生制动力时，只有制动能量回收系统起作用；当驱动轮上总的制动力大于此时能够提供的最大再生制动力时，再生制动力工作在最大值，其他制动力由摩擦制动力补充。

理想制动力分配时的再生制动控制框图如图6.27所示。输入量为总制动力和电动机最大再生制动力矩，其中总制动力由制动踏板力传感器得到，电动机的最大再生制动力矩由存储在芯片中的电动机特性曲线和电动机转速信号通过查表得到。输出量为前轮(驱动轮)再生制动力、前轮摩擦制动力和后轮摩擦制动力。

3. 并行制动力分配策略实现

并行制动力分配时前轮和后轮的总制动力按照图6.24分配，驱动轮上的再生制动力按照图6.25确定，驱动轮上的摩擦制动力大小等于驱动轮上总制动力减去驱动轮上的再生制动力。

并行制动力分配时的再生制动控制框图如图6.28所示。输入量为总制动力，由制动踏板力传感器得到。再生制动力由存储在芯片中的再生制动力控制曲线(图6.25)得到。前

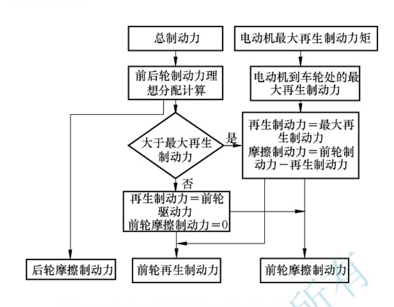


图 6.27　理想制动力分配时的再生制动控制框图

后轮总摩擦制动力等于总制动力减去再生制动力。前后轮摩擦制动力通过制动回路中的液压比例阀实现分配。控制算法的输出量为前轮(驱动轮)再生制动力、前轮摩擦制动力和后轮摩擦制动力。其中前轮(驱动轮)再生制动力由电动机控制单元实现控制。

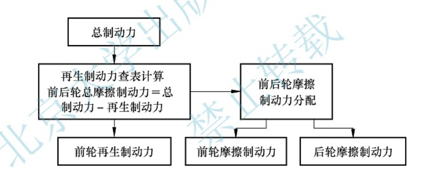


图 6.28　并行制动力分配时的再生制动控制框图

4. 最优制动力分配策略实现

最优制动力分配时，优先使用再生制动，即在总制动力小于或等于此时能提供的最大再生制动力时，只有制动能量回收系统起作用；当总制动力大于此时能提供的最大再生制动力时，剩余部分的制动力由摩擦制动力提供。

最优制动力分配时的再生制动控制算法框图如图 6.29 所示。控制算法的输入量为总制动力和电动机最大再生制动力矩。其中总制动力由制动踏板力传感器得到，电动机的最大再生制动力矩由存储在芯片中的电动机特性曲线和电动机转速信号通过查表得到。控制算法的输出量为前轮(驱动轮)再生制动力、前轮摩擦制动力和后轮摩擦制动力。这三个量分别输送到电动机控制单元、前轮摩擦制动力调节装置和后轮摩擦制动力调节装置。

将建立的三种控制策略模型嵌入 ADVISOR 中可以建立混合动力车型的制动力控制策略模型，通过仿真得到各种制动工况下的制动能量回收效率和制动力分配情况，研究再生

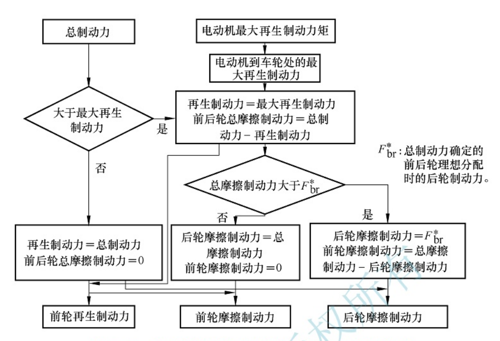


图 6.29　最优制动力分配时的再生制动控制算法框图

制动控制策略的有效性。如果制动能量回收效率和制动力分配情况不理想，可以对控制策略模型进一步优化。这里不再介绍。

6.4 混合动力汽车的能量管理

作为一种新型的多能量源交通工具，混合动力汽车的性能与其采用的能量管理策略密切相关。能量管理策略是传统燃油汽车与纯电动汽车完美结合的纽带，是混合动力汽车成败的最终决定性因素。

能量管理策略的控制目标是根据驾驶人的操作（如对加速踏板、制动踏板等的操作），判断驾驶人的意图，在满足汽车动力性能的前提下，最优地分配电动机、发动机、动力电池等部件的输出功率，实现能量的最优分配，提高汽车的燃**油经济性**和**排放性能**。由于混合动力汽车中电池不需要外部充电，因此能量管理策略还应考虑动力电池的荷电状态平衡，以延长电池寿命，降低汽车维护成本。

6.4.1 混合动力汽车的能量管理策略

混合动力汽车的结构不同，能量管理策略也不同。目前，国内外学者提出了各种各样的能量管理策略，下面给予简单介绍。

1. 串联式混合动力汽车的能量管理策略

由于串联式混合动力汽车的发动机与汽车行驶工况没有直接联系，因此其能量管理策略的主要目标是使发动机在最佳效率区和排放区工作。为了优化能量、分配整体效率，还应考虑传动系统的动力电池、发动机、电动机和发电机等部件。以下介绍串联式混合动力汽车的三种基本能量管理策略。

(1)恒温器策略

当动力电池SOC值低于设定的低门限值时，起动发动机，在最低油耗或排放点按恒功率模式输出，其中一部分功率用于满足车轮驱动功率要求，另一部分功率给动力电池充电。而当动力电池SOC值上升到所设定的高门限值时，发动机关闭，由电动机驱动汽车。该策略的优点是发动机效率高、排放低；缺点是动力电池充放电频繁，加上发动机开关时的动态损耗，使得系统总体的损失功率变大，能量转换效率较低。

(2)功率跟踪式策略

由发动机全程跟踪汽车功率需求，只有当动力电池的SOC值大于设定上限，并且仅由动力电池提供的功率能满足汽车需求时，发动机才停机或怠速运行。由于动力电池容量小，动力电池充放电次数减少而使得系统内部损失减少。但是发动机必须在从低到高的较大负荷区内运行，使得发动机的效率和排放不如恒温器策略下发动机的效率和排放。

(3)基本规则型策略

基本规则型策略综合了恒温器策略与功率跟踪式策略两者的优点，根据发动机负荷特性图设定了高效率工作区，根据动力电池的充放电特性设定了动力电池高效率的荷电状态范围；并设定一组控制规则，根据需求功率和SOC值进行控制，以充分利用发动机和动力电池的高效率区，使其达到整体效率最高。

2. 并联式混合动力汽车的能量管理策略

并联式混合动力汽车的能量管理策略基本属于基于转矩的控制。目前主要有以下四类。

(1)静态逻辑门限策略

静态逻辑门限策略通过设置车速、动力电池SOC值上下限、发动机工作转矩等一组门限参数，限定动力系统各部件的工作区域，并根据汽车实时参数及预先设定的规则调整动力系统各部件的工作状态，以提高汽车整体性能。其实现简单，目前实际应用较广泛。但由于主要依靠工程经验设置门限参数，静态逻辑门限策略无法保证汽车燃油经济性最优，而且这些静态参数不能适应工况的动态变化，无法使整车系统达到最大效率。

(2)瞬时优化能量管理策略

针对静态逻辑门限策略的上述缺点，一些学者提出了瞬时优化能量管理策略。瞬时优化能量管理策略一般采用等效燃油消耗最少法或功率损失最小法，二者原理类似(这里仅说明等效燃油消耗最少法)。等效燃油消耗最少法是将电动机的等效燃油消耗与发动机的实际燃油消耗之和定义为名义燃油消耗，将电动机的能量消耗转换为等效的发动机燃油消耗，得到一张类似于发动机万有特性图的电动机等效燃油消耗图。在某一个工况瞬时，从保证系统在每个工作时刻的名义燃油消耗最小出发，确定电动机的工作范围(用电动机转矩表示)，同时确定发动机的工作点，对每一对工作点计算发动机的实际燃油消耗及电动机的等效燃油消耗，最后选名义燃油消耗最小的点作为当前的工作点，实现对发动机、电动机输出转矩的合理控制。为了将排放一同考虑，该策略还可采用多目标优化技术，采用一组权值来协调排放和燃油同时优化存在的矛盾。等效燃油消耗最少法在每一步长内是最优的，但无法保证在整个运行区间内最优，而且需要大量的浮点运算和比较精确的汽车模型，计算量大，实现困难。

(3) 全局最优能量管理策略

全局最优能量管理策略是应用最优化方法和最优化控制理论开发出来的混合动力系统能量分配策略，目前主要有基于多目标数学规划方法的能量管理策略、基于古典变分法的能量管理策略和基于 Bellman 动态规划理论的能量管理策略三种。

研究最成熟的是基于 Bellman 动态规划理论的能量管理策略。该策略先建立空间状态方程，然后计算在约束条件下满足性能指标的最优解。为了满足电池荷电状态平衡下的约束条件，采用拉格朗日乘子法推导出的性能指标，除了包含燃油消耗，还包括荷电状态变化量。采用迭代方法计算其拉格朗日系数，可以得到满足荷电状态平衡的约束条件最优解。该策略只适用于特定的驾驶循环，即必须预先精确知道汽车的需求功率，因而不能用于在线控制。

全局优化模式实现了真正意义上的最优化，但实现这种策略的算法往往都比较复杂，计算量也很大，在实际汽车的实时控制中很难得到应用。通常的做法是把应用全局优化算法得到的能量管理策略作为参考，以帮助总结和提炼出能用于在线控制的能量管理策略，如与逻辑门限策略等相结合，在保证可靠性和实际可能性的前提下进行优化控制。

(4) 模糊能量管理策略

模糊能量管理策略基于模糊控制方法来决策混合动力系统的工作模式和功率分配，其将“专家”的知识以规则的形式输入模糊控制器中，模糊控制器将车速、电池 SOC 值、需求功率/转矩等输入量模糊化，基于设定的控制规则来完成决策，以实现对混合动力系统的合理控制，从而提高汽车整体性能。基于模糊逻辑的策略可以表达难以精确定量表达的规则；可以方便地实现不同影响因素(功率需求、SOC 值、电动机效率等)的折中；鲁棒性好。但是模糊控制器的建立主要依靠经验，无法获得全局最优。

3. 混联式混合动力汽车的能量管理策略

混联式混合动力汽车由于其特有的传动系统结构（如采用行星齿轮传动），除了采用瞬时优化能量管理策略、全局优化能量管理策略和模糊能量管理策略(与并联式混合动力汽车能量管理策略原理类似)以外，还有一些特有的能量管理策略，即发动机恒定工作点策略和发动机最优工作曲线策略。

(1) 发动机恒定工作点策略

由于采用了行星齿轮机构，发动机转速可以独立于车速变化，这样可使发动机工作在最优工作点，提供恒定的转矩输出，而剩余的转矩则由电动机提供。电动机负责动态部分，避免了发动机动态调节带来的损失，而且与发动机相比，电动机的控制也更灵敏，易于实现。

(2) 发动机最优工作曲线策略

发动机工作在万有特性图中最佳油耗线上，只有当发电机电流需求超出电池的接受能力或者当电动机驱动电流需求超出电动机或电池的允许限制时，才调整发动机的工作点。

6.4.2 混合动力汽车的工作模式

混合动力汽车的实际运行工况十分复杂，主要包括起步、加速、减速、巡航、上坡、下坡、制动、停车、倒车等。混合动力汽车是由两种动力源驱动的，由于发动机和电动机两套动力系统分别具有不同的高效工作区，为了充分发挥混合动力系统的优势，汽车在不同的运行工况下，应具有多种不同的工作模式，以充分提高汽车的整体性能。

1. 串联式混合动力汽车的工作模式

串联式混合动力汽车的工作模式主要如下。

(1) 纯电动模式。发动机关闭，汽车仅由动力电池供电、驱动。

(2) 纯发动机模式。汽车牵引功率仅来源于发动机/发电机组，而动力电池既不供电也不从驱动系统吸收任何功率，电设备组用作从发动机到驱动轮的电传动系统。

(3) 混合模式。牵引功率由发动机/发电机组和动力电池共同提供。

(4) 发动机牵引和电池充电模式。发动机/发电机组向动力电池充电和供给驱动汽车所需的功率。

(5) 再生制动模式。发动机/发电机组关闭，牵引电动机产生的电功率用于向动力电池充电。

(6) 电池充电模式。牵引电动机不接受功率，发动机/发电机组向动力电池充电。

(7) 混合式电池充电模式。发动机/发电机组和运行在发电机状态下的牵引电动机共同向动力电池充电。

2. 并联式混合动力汽车的工作模式

并联式混合动力汽车的工作模式主要如下。

(1) 纯电动模式。当汽车处于起步、低速等轻载工况且动力电池的电量充足时，若以发动机作为动力源，则发动机燃油效率较低，并且排放性能差。因此，关闭发动机，由动力电池提供能量并以电动机驱动汽车。但当动力电池的电量较低时，为保护电池，应当切换到行车充电模式。

(2) 纯发动机模式。在高速行驶等中等负荷情况下，汽车克服路面阻力运行所需的动力较小，一般情况下，主要由发动机提供动力。此时，发动机可工作于高效区域，燃油效率较高。

(3) 混合驱动模式。在加速或爬坡等大负荷情况下，汽车行驶所需的动力超过发动机工作范围或高效区时，由电动机提供辅助动力同发动机一同驱动汽车。若此时动力电池的剩余电量较低，则转换到纯发动机模式。

(4) 行车充电模式。在汽车正常行驶等中低负荷情况下，若动力电池的剩余电量较低，发动机除了要提供驱动汽车所需的动力外，还要提供额外的功率通过电动机发电以转化为电能给动力电池充电。

(5) 再生制动模式。当汽车减速或制动时，发动机不工作，电动机尽可能多地回收制动能量，剩余部分由机械制动器消耗。

(6) 怠速、停车模式。在怠速、停车模式下，通常关闭发动机和电动机，但当动力电池剩余电量较低时，需要开启发动机和电动机，此时控制发动机工作于高效区并拖动电动机为动力电池充电。

6.4.3 混合动力汽车的模糊逻辑能量管理策略

这里以并联式混合动力汽车为例进行介绍。并联式混合动力汽车的能量管理系统普遍采用分级分布式结构。最上层为能量管理系统的决策单元，统一协调和控制各个低端控制器；中间一层包括多个低端控制器；最下层为各个执行器。能量管理系统的决策单元接收驾驶人输入的指令、各个执行器的信息和环境信息，协调各子系统的工作。

1. 并联式混合动力汽车的能量管理策略

对同一种并联形式的混合动力汽车来说，采用不同的管理策略可以得到不同的燃油消耗、排放和电池SOC值。在设计混合动力汽车时，主要目的是在保证汽车性能的条件下降低汽车的燃油消耗和排放，同时，还要兼顾电池的寿命，基于这些目标，根据不同的侧重点，可以制定出不同的能量管理策略。

并联式混合动力系统的整车能量管理策略主要解决系统运行模式的切换和混合模式下功率的分配。

并联式混合动力系统有多种运行(能量流动)模式。根据不同的工况要求，以优化各部件工作点为目的，可以在这些运行模式中进行切换，主要有起步模式、加速模式、巡航模式、减速模式和驻车模式等，以适应不同的工况。

功率分配是系统能量管理策略研究的关键。通常功率分配被看作是一个以减小燃油消耗和改善排放为目标的优化问题。功率分配决定了混合动力系统中发动机的工作区域。根据优化程度(或者说发动机工作点选择方式)的不同，采用的功率分配策略也不同。大体上可以分为恒定工作点策略、优化工作区策略、ICE优化曲线策略、瞬时优化策略、全局优化策略、智能优化策略等。

结合模式切换和功率分配，并联式混合动力汽车各运行模式下的能量管理策略如下。

(1) 起步。由于电动机具有低速大转矩的特性，因此混合动力汽车的起步由电动机单独来完成。若动力电池SOC值较低，由发动机来提供起步时的动力；若动力电池的剩余电量适中，即SOC值为中等，则电动机驱动汽车，发动机关闭；若动力电池的剩余电量多，即SOC值较高，则电动机驱动汽车，发动机关闭。

(2) 低速或城市工况。当混合动力汽车在城市道路或低速行驶时，若动力电池SOC值较高或为中等，汽车所需动力由电动机单独提供，电动机所需能量由动力电池来供给；若动力电池SOC值较低，汽车所需动力由发动机提供，电动机转化为发电机为动力电池充电。

(3) 加速。在加速模式下，控制策略主要是基于电池荷电状态来制定的。它主要是由电能源提供给汽车附加的驱动力的状态来决定的，主要考虑以下三种方式。

① 当动力电池SOC值较高时，若汽车此时是弱加速，电动机只提供部分功率来辅助发动机驱动汽车；若此时汽车是急加速，电动机则提供最大功率来辅助发动机。

② 当动力电池SOC值为中等时，无论汽车是弱加速还是急加速，发动机工作，而电动机驱动汽车，并提供部分功率辅助汽车的加速。

③ 当动力电池SOC值较低时，电动机空转，发动机的节气门全开。

(4) 巡航。当发动机以恒定的速度行驶时，由于汽车克服路面阻力保持恒定速度行驶时的转矩是很小的，因此，发动机主要提供平均功率而不是峰值功率。此时，当发动机的功率大于路面所需要的功率，并且动力电池SOC值较低时，电动机转化为发电机提供电能给动力电池充电以满足下一步的使用要求。

(5) 减速。在这种模式下，会有部分制动能量回收，通常有松开加速踏板和踩下制动踏板两种模式。在第一种模式下，电动机的反拖作用使车速缓慢下降，若动力电池SOC值较低或为中等，部分制动能量被回收，此时发动机关闭，电动机提供部分负转矩来给动力电池充电；在第二种模式下，车速迅速下降，若动力电池SOC值较低或为中等，大量

的制动能量被回收，电动机提供最大的负转矩来给动力电池充电，发动机关闭。如果动力电池的剩余电量多，即动力电池 SOC 值较高，则电动机空转，发动机关闭。

(6) 驻车。当系统处于驻车模式时，此时汽车是不需要能量的，因此电动机空转，发动机关闭。若此时动力电池 SOC 值较低，则发动机开启驱动电动机给动力电池充电。

2. 并联式混合动力汽车的模糊逻辑能量管理策略

由于汽车的各种不同工况下的能量需求，以及电池的荷电状态，混合动力汽车能量管理系统是一个复杂的非线性系统。而模糊控制是基于模糊推理，模仿人的思维方式，对难以建立精确数学模型的对象实施的一种控制。它是模糊数学同控制理论相结合的产物。它具有不要求知道被控对象的精确数学模型，只需要提供现场操作人员的经验知识及操作数据；控制系统的鲁棒性适于解决常规控制难以解决的非线性、时变及滞后系统；以语言变量代替常规的数学变量，易于构造形成专家的“知识”；控制推理采用“不精确推理”等优点。为了改善控制的性能，提高并联式混合动力汽车对各种工况的适应能力，通过对混合动力系统能量管理策略的研究，将模糊控制这种智能控制技术引入整车能量管理控制系统中。

模糊逻辑能量管理策略的实现基于这样一个事实：动力电池与电动机工作所需的电能，源于发动机的热能，在利用电驱动时，由于经过能量转换，导致能量损失一般大于发动机直接驱动的情况。但是，在某些工况下，电驱动的能量损失也可能小于发动机直接驱动的损失。例如，当汽车在低负荷行驶时，若由发动机直接驱动，其运行效率较低，总的能量利用效率即运行效率；若由电驱动，总的能量利用效率要考虑电动机的机械效率、电池的库仑效率及电池充电时发动机的运行效率。显然，若把电池充电控制在发动机运行效率较高时进行，则电池充电时发动机的运行效率大于发动机直接驱动时的运行效率，从而使由电驱动时总的能量利用效率大于发动机直接驱动时总的能量利用效率，即在某些工况下，利用电驱动是有利的。模糊逻辑能量管理策略通过综合考虑发动机、动力电池和电动机的工作效率，可以实现混合驱动系统的整体效率最高。

3. 并联式混合动力汽车模糊逻辑能量管理的控制目标及原则

(1) 控制目标

模糊逻辑能量管理策略的目标主要是实现最佳燃油效率并兼顾排放和动力电池荷电状态。最佳效率要求发动机平稳地工作在某一区域，在这一区域发动机的燃油效率较高，并且是发动机最佳燃油曲线向两侧的适当延伸。图 6.30 中虚线所示区域为发动机工作区间。兼顾动力电池荷电状态要求在一定的运行工况下，动力电池 SOC 值的变化范围尽可能在动力电池使用寿命长、充放电效率高的区域，这里也体现了动态能量平衡原则。

用模糊逻辑管理的方法是为了实现在不同驾驶人意图和不同路面环境下混合动力汽车的自动控制，以满足汽车辆行驶的不同要求，达到在保证电池效率和使用寿命的情况下，既满足整车性能要求又获得较好经济性和排放的目标。

(2) 控制的主要原则

根据所提出的并联式混合动力汽车整车能量管理策略，结合控制目标，确定模糊逻辑能量管理的控制原则如下。

① 为延长动力电池的使用寿命和提高动力电池的充放电效率，动力电池的荷电状态在循环工况的起始和结束时，应基本保持不变。

② 为提高整车系统效率，发动机应尽可能在高效率区工作，因此，在动力电池荷电

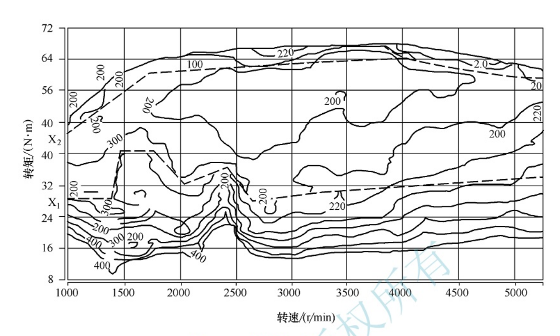


图 6.30 发动机工作区间定义

状态允许的情况下，对于起步或城市道路低、中速运行模式，尽可能用电动机起步或驱动。

③ 在混合动力驱动系统中，控制系统将以发动机为主能源，电动机为辅助能源。管理系统根据汽车需求转矩与发动机最优转矩的差值，结合动力电池荷电状态，决定电动机工作状态，以此来调节发动机的工作状态，保证或尽量使发动机工作在最优燃油转矩曲线上。

④ 在保证制动安全的前提下，回收制动能量。

4. 并联式混合动力汽车的模糊推理系统结构

MatLab 模糊逻辑工具箱提供了模糊逻辑控制器和系统设计的全部环节，包括定义输入和输出控制变量、设计隶属函数、编辑控制规则、选择推理方法及反模糊化方法等，并提供了图形用户界面的形式，极大地方便了用户，不用在烦琐的计算中花费过多的时间，所有规则的模糊运算、模糊蕴含、模糊合成和反模糊化都由计算机来完成。

针对混合动力汽车在效率与排放、SOC 值等控制方面的要求，应用 MatLab 平台下的 Fuzzy 编辑器，建立两输入、一输出的模糊推理系统，其结构如图 6.31 所示。

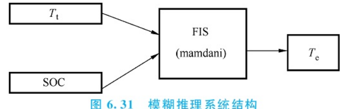


图 6.31 模糊推理系统结构

5. 并联式混合动力汽车的模糊控制变量

图 6.31 所示的模糊推理系统的输入变量有两个，分别为下游动力传动部件总的请求转矩 T_t 和动力电池 SOC 值。两个变量分别用于表示整车和动力电池的工作效率情况。其



中，动力电池的荷电状态与工作效率的关系很明显，而总的请求转矩表示的是负荷水平，与发动机的运行效率不直接相关，但是，通过建立发动机高效运行功率的模糊集可使它与发动机效率相关联。该模糊推理系统的输出变量为发动机转矩 T_e。

(1) 输入变量论域

输入变量 T_t 的论域为 [0，T_{max}]，当驾驶人的请求转矩高于发动机最大转矩 T_{max} 时，采用发动机工作于最大转矩曲线上的控制方法；当请求转矩小于零时，采用制动控制策略，即请求转矩全部由电动机提供，作为发电机为动力电池充电。因此模糊控制论域定为 [0，T_{max}]。为方便起见，将输入变量论域转化到 [−3，+3] 上，"−3" 表示零转矩，"0" 表示优化转矩，"+3" 表示最大转矩。其中优化转矩可以是优化燃油转矩曲线或最大效率曲线，这里采用优化燃油转矩曲线并参照 ICE 优化曲线控制策略，如图 6.32 所示，图中优化转矩曲线表示的是优化燃油转矩曲线。

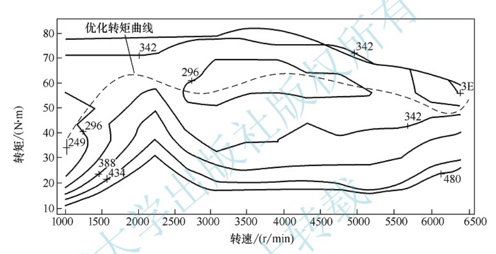


图 6.32　ICE 优化曲线控制策略

如图 6.33 所示，输入转矩 T_t 论域制定基于以下原则。

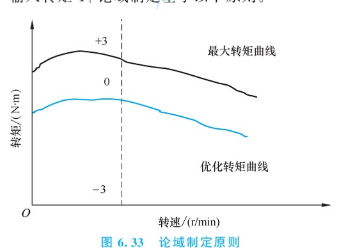


图 6.33　论域制定原则

当输入变量 $T_t \leqslant T_{opt}$ (T_{opt} 是优化转矩，即发动机优化燃油转矩) 时，T_t 论域为 [−3，0]；当输入变量 $T_t > T_{opt}$ 时，T_t 的论域为 [0，+3]。

将精确量 [0，T_{opt}] 转化到区间 [−3，0] 的公式为

$$\overline{T}_t = \frac{3\times(T_t - T_{opt})}{T_{opt}} \tag{6-40}$$

将精确量［T_{opt}，T_{max}］转化到［0，+3］的公式为

$$\overline{T}_t=\frac{3\times(T_t-T_{opt})}{T_{max}-T_{opt}} \tag{6-41}$$

式中，$\overline{T}_t$ 为转化后的转矩值；T_t 为实际输入的转矩值；T_{opt}为优化燃油转矩值；T_{max}为发动机最大转矩值。

输入变量SOC的论域为［0，1］。“0”表示SOC的最小值，“1”表示SOC的最大值。

（2）输出变量论域

模糊逻辑控制器的输出变量 T_e 的论域也在［−3，+3］上，将其转化为实际输出转矩［x_1，x_2］，这里［x_1，x_2］为图6.30中的发动机工作区间的上下界。

（3）控制变量模糊子集

通常情况下，像误差和误差变化等语言变量的模糊语言子集一般取为｛负大，负中，负小，零，正小，正中，正大｝或｛NB，NM，NS，ZE，PS，PM，PB｝等。因此，输入变量 T_t 和输出变量 T_e 的模糊子集取为

｛负大，负中，负小，零，正小，正中，正大｝

或｛NB，NM，NS，ZE，PS，PM，PB｝

动力电池SOC值的模糊子集取为

｛太低，较低，低，适中，高，较高，太高｝

或｛very low，lower，low，normal，high，higher，very high｝

输入变量 T_t 的模糊语言表述是通过比较请求转矩和优化转矩而得到的，如为“负大”时，表示请求转矩比优化转矩小很多；为“零”时表示请求转矩与优化转矩相等。

6. 控制变量的隶属函数

输入变量的隶属函数的设计主要根据发动机、动力电池和电动机的效率Map图确定各自高效运行的模糊集。输入变量隶属函数的确定方法主要有模糊统计法、二元对比排序法、专家经验法和借助常见模糊分布等方法。输入变量和输出变量均选用钟型隶属函数。图6.34所示是输入变量 T_t 和输出变量 T_e 的隶属函数曲线，图6.35所示是输入变量动力电池SOC值的隶属函数曲线。

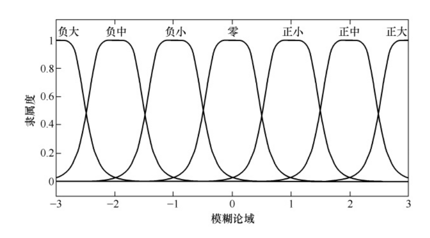


图6.34 输入变量 T_t 和输出变量 T_e 的隶属函数曲线

7. 模糊逻辑控制规则

控制规则是整个模糊逻辑控制环节的核心，每一条规则必须是准确的，而且能够反映

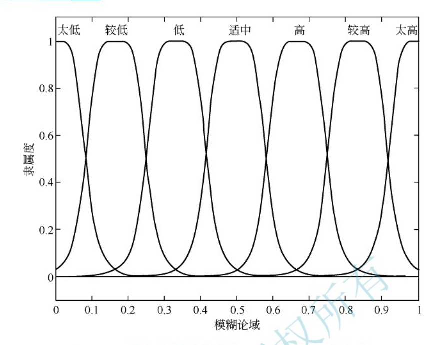


图 6.35　输入变量动力电池 SOC 的隶属函数曲线

设计者的控制意图。通过对初步建立的模糊规则进行多次修正和试凑，根据发动机工作模式和电池荷电状态的不同，按照在某一特定道路循环下动力电池充放电平衡的原则，建立转矩分配的控制规则：如果请求转矩与发动机优化转矩相比大很多，并且动力电池 SOC 值较高，则控制发动机工作在最优燃油转矩曲线上，即电动机参与工作，提供辅助转矩；如果请求转矩在优化转矩附近，当动力电池 SOC 值高时，控制发动机工作在低于最优燃油转矩曲线附近，而当动力电池 SOC 值较低时，控制发动机工作在最优燃油转矩曲线上；如果请求转矩比优化转矩小很多，当动力电池 SOC 值高或为中等时，控制发动机停止工作，由电动机提供驱动转矩；当动力电池 SOC 值较低时，控制发动机工作在最优燃油转矩曲线附近，多余能量用于驱动电动机转化为发电机发电等。模糊控制模型中建立的相应模糊规则见表 6－5。

表 6－5　模糊控制模型中建立的相应模糊规则

T_t / T_e / SOC	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
very low	ZE	PS	PS	PM	PM	PB	PB
lower	NS	ZE	PS	PS	PM	PM	PB
low	NS	ZE	ZE	PS	PS	PM	PB
normal	NM	NS	ZE	ZE	ZE	PS	PM
high	NM	NS	NS	ZE	ZE	ZE	PS
higher	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE	ZE
very high	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE

也可以用 IF…and…THEN 模糊语言来描述控制规则，现举例如下。

（1）IF T_t is NM and SOC is very low THEN T_e is PS。

（2）IF T_t is NS and SOC is low THEN T_e is ZE。

(3) IF T_t is ZE and SOC is normal THEN T_e is ZE。

(4) IF T_t is PM and SOC is high THEN T_e is ZE。

上述条控制规则的含义如下。

(1) 整车传动部件总的请求转矩比优化转矩小较多，并且动力电池 SOC 值很低时，发动机工作在低于最优燃油转矩曲线附近，直接输出驱动转矩，多余能量用于电动机转化为发电机给动力电池充电。

(2) 整车传动部件总的请求转矩与优化转矩相差不大，并且动力电池 SOC 值低时，电动机不工作，发动机按最优燃油转矩曲线工作，直接输出驱动转矩。

(3) 整车传动部件总的请求转矩与优化转矩相等，并且动力电池 SOC 值正常时，电动机不工作，发动机按最优燃油转矩曲线工作，直接输出驱动转矩。

(4) 整车传动部件总的请求转矩比优化转矩大很多，并且动力电池 SOC 值高时，电动机参与工作并提供辅助转矩，调节发动机按最优燃油转矩曲线工作。

8. 仿真结果

在并联混合动力整车仿真模型结构中，各动力总成采用 ADVISOR 原有模型并分别应用模糊逻辑管理策略和并联电辅助式管理策略进行仿真，各种性能的仿真结果(采用 1 个循环)比较见表 6-6。

表 6-6 性能仿真结果比较

管　　理	排放/(g/km)			油耗	动力性能		传动系统
	HC	CO	NO_x	(L/100km)	加速时间/s (0～96.6km/h)	最高车速/(km/h)	总效率/(%)
模糊逻辑	0.337	1.387	0.15	5.1	12.6	154	93.26
电辅助式	0.334	1.61	0.183	5.4	10.1	183.8	93.05

模糊逻辑能量管理策略的控制目标不仅在于提高发动机的工作效率，而且从系统整体效率出发，在兼顾排放和油耗的同时，对发动机、电动机和动力电池的效率均予以考虑，是一种较理想的能量管理策略。电气辅助能量管理策略只是将电动机的优化工作区限定在一个范围内，对排放考虑较少，控制策略简单，因此其优化的效果也是有限的。

动力性能方面采用模糊逻辑管理策略后，汽车动力性在某些方面同采用电辅助管理策略相比有些下降，这是模糊逻辑管理策略进行折中计算的结果。相互对立的方面不可兼得，整体效率的提高是以动力性能的部分下降为前提的，但其结果完全可以满足正常行驶的需要。



1. 混合动力汽车有哪些类型？其特点是什么？
2. 在混合动力汽车设计中，如何确定发动机、电动机和动力电池参数？
3. 混合动力汽车制动能量回收系统的功能是什么？
4. 混合动力汽车能量管理系统的功能是什么？

第 7 章　燃料电池电动汽车


【燃料电池电动汽车 1】


【燃料电池电动汽车 2】

采用燃料电池作电源的电动汽车称为燃料电池电动汽车。燃料电池电动汽车一般以质子交换膜燃料电池作为车载能量源。

7.1　概　　述

7.1.1　燃料电池电动汽车的类型

燃料电池电动汽车按主要燃料种类可分为以下两类。

(1) 以纯氢气为燃料的燃料电池电动汽车。

(2) 以经过重整后产生的氢气为燃料的燃料电池电动汽车。

燃料电池电动汽车按“多电源”的配置不同，可分为以下四类。

(1) 纯燃料电池驱动的燃料电池电动汽车。

(2) 燃料电池与辅助电池联合驱动(FC+B)的燃料电池电动汽车。

(3) 燃料电池与超级电容器联合驱动(FC+C)的燃料电池电动汽车。

(4) 燃料电池与辅助电池和超级电容器联合驱动(FC+B+C)的燃料电池电动汽车。

1. 纯燃料电池驱动的燃料电池电动汽车

纯燃料电池电动汽车只有燃料电池一个动力源，汽车的所有功率负荷都由燃料电池承担。纯燃料电池电动汽车的动力系统结构如图 7.1 所示。

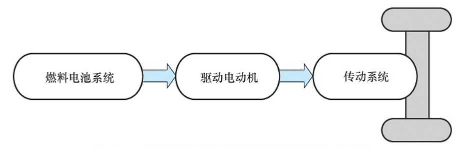


图 7.1　纯燃料电池电动汽车的动力系统结构

燃料电池系统将氢气与氧气反应产生的电能通过总线传给驱动电动机，驱动电动机将电能转化为机械能再传给传动系统，从而驱动汽车前进。

(1) 燃料电池系统的优点如下。

① 系统结构简单，便于实现系统控制和整体布置。

② 系统部件少，有利于整车的轻量化。

③ 较少的部件使得整体的能量传递效率高，从而提高整车的燃料经济性。

(2) 燃料电池系统的缺点如下。

① 燃料电池功率大、成本高。

② 对燃料电池系统的动态性能和可靠性提出了很高的要求。

③ 不能进行制动能量回收。

为了有效地解决上述问题，必须使用辅助能量储存系统作为燃料电池系统的辅助动力源，与燃料电池联合工作，组成混合驱动系统共同驱动汽车。从本质上来讲，这种结构的燃料电池电动汽车采用的是混合动力结构。它与传统意义上的混合动力结构的差别仅在于发动机是燃料电池而不是内燃机。在燃料电池混合动力结构汽车中，燃料电池和辅助能量储存装置共同向电动机提供电能，通过变速机构来驱动汽车行驶。

2. 燃料电池与辅助电池联合驱动的燃料电池电动汽车

燃料电池与辅助电池联合驱动的燃料电池电动汽车的动力系统结构如图 7.2 所示。该结构为典型的串联式混合动力结构。在该动力系统中，燃料电池系统和辅助电池一起为驱动电动机提供能量，驱动电动机将电能转化为机械能传给传动系统，从而驱动汽车前进。在汽车制动时，驱动电动机转化为发电机，辅助电池将储存回馈的能量。在燃料电池系统和辅助电池联合供能时，燃料电池的能量输出变化较平缓，随时间变化波动较小，而能量需求变化的高频部分由辅助电池分担。

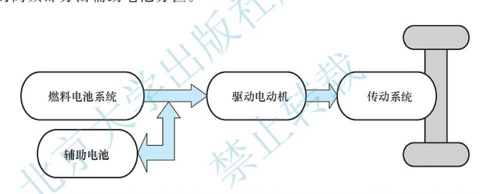


图 7.2 燃料电池与辅助电池联合驱动的燃料电池电动汽车的动力系统结构

(1) 这种结构形式的优点如下。

① 由于增加了比功率价格相对低廉得多的辅助电池，系统对燃料电池的功率要求较纯燃料电池电动汽车结构形式有很大的降低，从而大大地降低了整车成本。

② 燃料电池可以在比较好的设定的工作条件下工作，工作时燃料电池的效率较高。

③ 系统对燃料电池的动态响应性能要求较低。

④ 汽车的冷起动性能较好。

⑤ 制动能量回收的采用可以回收汽车制动时的部分动能，该措施可能会增加整车的能量效率。

(2) 这种结构形式的缺点如下。

① 辅助电池的使用使得整车的质量增加，动力性和经济性受到影响，这一点在能量复合型混合动力汽车上表现更明显。

② 辅助电池充放电过程会有能量损耗。

③ 系统变得复杂，系统控制和整体布置难度增加。

3. 燃料电池与超级电容器联合驱动的燃料电池电动汽车

这种结构形式和燃料电池与辅助电池联合的结构相似，只是把辅助电池换成了超级电容器。相对于辅助电池即蓄电池，超级电容器充放电效率高，能量损失小，比蓄电池功率密度大，在回收制动能量方面比蓄电池有优势，循环寿命长，但是超级电容器的能量密度较小。随着超级电容器技术的不断进步，这种结构形式将成为重要的研究课题及发展方向。

4. 燃料电池与辅助电池和超级电容器联合驱动的燃料电池电动汽车

燃料电池与辅助电池和超级电容器联合驱动的燃料电池电动汽车的动力系统结构如图 7.3 所示，该结构也为串联式混合动力结构。在该动力系统中，燃料电池系统、辅助电池和超级电容器一起为驱动电动机提供能量，驱动电动机将电能转化为机械能传给传动系统，从而驱动汽车前进；在汽车制动时，驱动电动机转化为发电机，辅助电池和超级电容器将储存回馈的能量。在采用燃料电池系统、辅助电池和超级电容器联合供能时，燃料电池的能量输出较平缓，随时间变化波动较小，而能量需求变化的低频部分由辅助电池承担，能量需求变化的高频部分由超级电容器承担。在这种结构中，各动力源的分工更加明细，因此它们的优势也得到了更好的发挥。

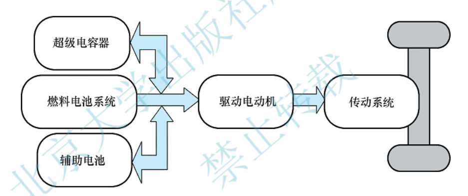


图 7.3　燃料电池与辅助电池和超级电容器联合驱动的燃料电池电动汽车的动力系统结构

这种结构形式的优点比燃料电池与辅助电池联合的结构形式的优点更加明显，尤其是在部件效率、动态特性、制动能量回收等方面更有优势。

而其缺点也一样更加明显。

(1) 增加了超级电容器，整个系统的质量将可能增加。

(2) 系统更加复杂，系统控制和整体布置的难度也随之增大。

总的来说，如果能够对系统进行很好的匹配和优化，这种结构在给汽车带来良好的性能方面具有很大的吸引力。

在三种混合动力系统中，燃料电池与辅助电池和超级电容器联合的结构形式被认为能够最大限度满足整车的起动、加速、制动的动力和效率需求，但成本最高，结构和控制也最复杂。目前燃料电池电动汽车动力系统的一般结构是燃料电池与辅助电池联合。这是因为它具有以下特点。

(1) 燃料电池单独或与辅助电池共同提供持续功率，而在汽车起动、爬坡和加速等工况有峰值功率需求时，辅助电池提供峰值功率。

(2) 在汽车起步和功率需求量不大时，辅助电池可以单独输出能量。

（3）辅助电池技术比较成熟，可以在一定程度上弥补燃料电池技术上的不足。

可用于燃料电池电动汽车的辅助电池包括铅酸蓄电池、镍镉蓄电池、镍锌蓄电池、锌空气电池、铝空气电池、钠硫蓄电池、钠镍氯化物电池、锂聚合物电池和锂离子蓄电池等。

目前，燃料电池与辅助电池混合动力系统主要有两种结构形式：燃料电池直接混合系统和辅助电池直接混合系统。

燃料电池直接混合系统是将燃料电池直接接入直流母线，所以驱动系统的电压必须设计在燃料电池可以调节的范围内，由于辅助电池需要向驱动系统传输能量，并从燃料电池和汽车系统取得能量，因此必须安装双向DC/DC转换器，而且必须有响应速度快的特点。燃料电池和辅助电池之间的功率平衡由DC/DC转换器和燃料电池管理系统共同实现。该结构形式对于燃料电池的输出电压达到了最优化设计；但是对燃料电池的要求比较高，同时DC/DC转换器要实现双向快速控制，双向DC/DC转换器的成本较高，而且整个系统的控制也比较复杂。

在辅助电池直接混合系统中，DC/DC转换器将燃料电池的输出电压和系统电压分开，驱动系统电压可以设计得比较高，这样可以降低驱动系统的电流值，有利于延长各电器元件的寿命，同时高的系统电压可以充分满足辅助电池的需要。DC/DC转换器还负责燃料电池和辅助电池之间的功率平衡。但是由于燃料电池的能量输出需要通过DC/DC转换器才能进入直流母线，导致系统的效率比较低，特别是对于连续负载来说不是最优化设计。例如，匀速工况，系统功率需求较小，只由燃料电池单独提供汽车行驶所需的功率。

上述两种结构形式的主要差别在于DC/DC转换器的使用上。DC/DC转换器的位置和结构决定了动力系统的构型。DC/DC转换器的位置主要取决于电动机及其控制器特性和燃料电池的特性，以及混合度。

7.1.2 燃料电池电动汽车的特点



【丰田Mirai氢燃料电池电动汽车】

1. 燃料电池电动汽车的优点

燃料电池电动汽车技术与传统汽车、纯电动汽车技术相比，具有以下优点。

（1）效率高。燃料电池的工作过程是化学能转化为电能的过程，不受卡诺循环的限制，能量转换效率较高，可以达到30%以上，而汽油机汽车和柴油机汽车整车效率分别为16%～18%和22%～24%。

（2）续驶里程长。采用燃料电池系统作为能量源，克服了纯电动汽车续驶里程短的缺点，其长途行驶能力及动力性已经接近于传统汽车。

（3）绿色环保。燃料电池没有燃烧过程，以纯氢作燃料，生成物只有水，属于零排放。采用其他富氢有机化合物用车载重整器制氢作为燃料电池的燃料，生产物除水之外还可能有少量的CO_2，接近零排放。

（4）过载能力强。燃料电池除了在较宽的工作范围内具有较高的工作效率外，其短时过载能力可达额定功率的200%或更大。

（5）低噪声。燃料电池属于静态能量转换装置，除了空气压缩机和冷却系统以外无其他运动部件，因此与内燃机汽车相比，运行过程中的噪声和振动都较小。

(6) 设计方便、灵活。燃料电池汽车可以按照 X-By-Wire 的思路进行汽车设计，改变了传统的汽车设计理念，可以在空间和质量等问题上进行灵活的配置。

2. 燃料电池电动汽车的缺点

(1) 燃料电池电动汽车的制造成本和使用成本过高。燃料电池系统的制造成本居高不下，国内约每千瓦 3 万元，国外约每千瓦 3000 美元，与传统内燃机仅每千瓦 200～350 元相比，差距巨大。使用成本过高，如高纯度(99.999%)高压(大于 200bar，1 bar=10^5 Pa)氢 1kg 售价80～100 元，按 1kg 氢可发 10kW·h 电能计算，仅燃料费约为每千瓦时 10 元，按燃料电池工作寿命 1000h 计算，折旧费为每千瓦时 30 元，总的动力成本达每千瓦时 40 元。目前由燃料电池提供 1kW·h 电能的成本远高于各种动力电池，这从一个侧面反映了作为汽车动力源，燃料电池还有相当的距离。

(2) 辅助设备复杂且质量和体积较大。在以甲醇或者汽油为燃料的燃料电池电动汽车中，经重整器出来的“粗氢气”含有使催化剂“中毒”失效的少量有害气体，必须采用相应的净化装置进行处理，增加了结构和工艺的复杂性，并使系统变得笨重。目前普遍采用的氢气燃料的燃料电池电动汽车，因需要高压、低温和防护的特种储存罐，导致体积庞大，也给燃料电池电动汽车的使用带来了许多不便。

(3) 起动时间长，系统抗振能力有待进一步提高。采用氢气为燃料的燃料电池电动汽车起动时间一般需要超过 3min，而采用甲醇或者汽油重整技术的燃料电池电动汽车则长达 10min，比内燃机汽车起动的时间长得多，影响其机动性能。此外，当燃料电池电动汽车受到振动或者冲击时，各种管道的连接和密封的可靠性需要进一步提高，以防止泄漏，降低效率，严重时引发安全事故。

7.1.3 燃料电池电动汽车对燃料电池的基本要求

燃料电池电动汽车对燃料电池的基本要求如下。

(1) 燃料电池的比能量不低于 150～200W·h/kg，比功率不低于 300～400W/kg，要求达到或超过美国先进电池联盟提出的电池性能和使用寿命的指标。

(2) 可以在-20℃的条件下起动和工作，有可靠的安全性和密封性，不会发生燃料气体的结冰和燃料气体的泄漏。

(3) 各种结构件有足够的强度和可靠性，可以在负荷变化情况下正常运转，并能够耐受燃料电池电动汽车行驶时的振动和冲击。

(4) 燃料电池电动汽车除排放达到零污染的要求外，动力性能要求基本达到或接近内燃机汽车动力性能的水平，性能稳定可靠。

(5) 各种辅助技术装备的外形尺寸和辅助技术装备的质量应尽可能地减小，以符合燃料电池电动汽车的装车要求。

(6) 燃料充添方便、迅速。燃料电池能够方便地进行电极和催化剂的更换与修理。

(7) 所配置的辅助电源应能满足提供起动电能和储存制动反馈电能的要求。

7.1.4 燃料电池电动汽车的关键技术

1. 燃料电池系统

燃料电池是燃料电池电动汽车发展的最关键技术之一。车用燃料电池系统的核心是燃

料电池堆。燃料电池堆技术发展趋势可用耐久性、低温启动温度、净输出比功率及制造成本四个要素来评判。燃料电池堆研究正在向高性能、高效率和更高耐久性方向努力。

降低成本也是燃料电池堆研究的目标，控制成本的有效手段是减少材料(电催化剂、电解质膜、双极板等)的费用，降低(膜电极制作、双极板加工和系统装配等的)加工费。但是如何在材料价格与系统性能之间做到平衡，依然需要继续研究。以电催化剂为例，非铂催化剂体系虽然在降低成本上有潜力，但是其性能却远远无法达到车用燃料电池系统的要求。人们一直在努力降低铂的使用量，但即便是膜电极中有高负载量(如 Pt 担载量为 $1mg/cm^2$)，其性能也不能满足车用功率的需求。如何更有效地利用电催化剂的活性组分，使活性组分长期保持高活性状态，延长催化剂使用寿命，是催化剂研究应该考虑的重点。

另外，作为车用燃料电池系统还需要攻克许多工程技术壁垒，包括系统启动与关闭时间、系统能量管理与变换操作、电堆水热管理模式及低成本高性能的辅助设施(包括空气压缩机、传感器和控制系统)等。

2. 车载储氢系统

储氢技术是氢能利用走向规模化应用的关键。目前，常见的车载储氢系统有高压储氢、低温储存液氢和金属氢化物储氢三种基本方法。对于车载储氢系统，美国能源部提出在续驶里程与标准汽油机汽车相当的燃料电池电动汽车车载储氢目标是质量储氢密度6%、体积储氢密度 $60kg/m^3$。纵观现有储氢方法，除了低温储存液氢技术，其他技术都不能完全达到以上指标。而低温储氢的成本与能耗都很大，作为车载储氢并不是最佳选择。

如何有效减小储氢系统的质量与体积，是车载储氢技术研发的重点。一个比较理想的方案是，采用储氢材料与高压储氢复合的车载储氢新模式，即在高压储氢容器中装填质量较轻的储氢材料，这种装置与纯高压(大于 40MPa)储氢方式相比，既可以降低储氢压力(约 10MPa)，又可以提高储氢能力。复合式储氢模式的技术难点是如何开发吸、放氢性能好，成型加工性良好，质量轻的储氢材料。

3. 车载蓄电系统

车载蓄电系统包括铅酸蓄电池、镍氢蓄电池、锂离子蓄电池等蓄电池及超级电容器。铅酸蓄电池作为汽车起动电源已经十分成熟，但由于其功率密度低，充电时间长，作为未来电动汽车动力系统的可能性很小；镍氢蓄电池具有高比能、大功率、快速充放电、耐用性优异等特点，是目前混合动力汽车和电动汽车广泛采用的绿色动力蓄电系统；锂离子蓄电池具有比能量大、比功率高、自放电小、无记忆效应、循环特性好、可快速放电等优点，已进入电动汽车动力电源行列。

超级电容器能在短时间内提供或吸收大的功率(为蓄电池的数十倍)。其效率高、具有上万次的循环寿命和极长的储存寿命、工作温度范围宽、能使用的基础材料价格低，可以作为混合型动力汽车的有效蓄电系统。但其能量密度低，能否作为独立的车用动力系统大规模推广，还有待更多的运行数据佐证。

4. 电动机及其控制技术

驱动电动机是燃料电池电动汽车的心脏，正向大功率、高转速、高效率和小型化方向发展。当前驱动电动机主要有永磁无刷电动机和感应电动机。永磁无刷电动机具有较高的功率

密度和效率、体积小、惯性低和响应快等优点，在电动汽车方面有着广阔的应用前景。由感应电动机驱动的电动汽车几乎都采用矢量控制和直接转矩控制。矢量控制又分为最大效率控制和无速度传感器矢量控制。前者是使励磁电流随着电动机参数和负载条件变化，从而使电动机的损耗最小、效率最大；后者是利用电动机电压、电流和电动机参数来估算出速度，不用速度传感器，从而达到简化系统、降低成本、提高可靠性的目的。直接转矩控制克服了矢量控制中需要解耦的不足，把转子磁通定向变换为定子磁通定向，通过控制定子磁链的幅值及该矢量相对于转子磁链的夹角，从而达到控制转矩的目的。由于直接转矩控制手段直接、结构简单、控制性能优良和动态响应迅速，因此非常适合用于电动汽车的控制。

5. 整车布置

燃料电池电动汽车在整车布置上存在以下关键问题：燃料电池系统及电动机的相关布置、动力电池组的车身布置、氢气瓶的安全布置及高压电安全系统的车身布置等。这些核心部件的布置，不仅要考虑布置方案的优化及零部件性能实现的便利，还要求相关方案必须考虑传统汽车不具备的安全性问题。目前由国内外几轮样车试制的过程来看，燃料电池及驱动电动机同时进前舱是一种技术趋势，辅助电池沿车身主轴纵向布置好于零星布置，氢气瓶的布置更多地要考虑碰撞安全性。

6. 整车热管理

燃料电池电动汽车整车热管理有两方面特性需要关注。

(1) 燃料电池自身的运行温度为60～70℃，实际的散热系统工作温度大致可以控制在60℃。这样一来与整车运行的环境温度相比，温差不大，造成燃料电池电动汽车无法像传统汽车一样依赖环境温差散热，而必须依赖整车动力系统提供额外的冷却动力为系统散热。这样从动力系统效率角度出发是不经济的，二者之间的平衡将是在热管理开发方面必须关注的。

(2) 目前整车各零部件的体积留给整车布置回旋的余地很小，造成散热系统设计的改良空间不大，无法采用通用的解决方案应对，必须开发专用的零部件(如特殊构造或布置的冷凝器、高功率的冷却风扇等)。这样就要求有丰富的整车散热系统的基础数据以支持相关开发设计，而这点正好是目前国内整车企业欠缺的。

另外，与整车散热系统密切相关的车用空调系统开发也是整车企业必须关注的。由于燃料电池电动汽车没有传统的汽油发动机，传统空调的压缩机动力源发生了颠覆性变化，改用纯电动压缩机作为空调系统的动力源。这样在进行整车散热系统需求分析时，空调系统性能需求作为整车散热系统的“负载”因素也成为散热系统开发的技术难点。

7. 整车与动力系统的参数选择和优化设计

燃料电池汽车整车性能参数是整个燃料电池动力系统开发的信息来源，而虚拟配置的动力系统的特性参数也影响整车性能。两者之间的参数选择是一个多变量多目标的优化设计过程，而且参数选择与行驶工况和控制策略紧密相关，只有在建立准确的仿真模型的基础上，经过反复寻优计算才可能达到较好的设计结果。目前参数设计主要借助于通用的或专用的仿真软件进行离线仿真，如ADVISOR、EASY5、PSCAD等，其优点是方便快捷，适合于在设计初期对系统性能进行宏观的预估和评价，但难以对动力系统进行深入细致的

分析与设计。随着系统开发的不断深入，某些已经存在的部件或环节将会集成仿真回路进行测试与研究，这些部件包括难建模部件、整车控制器等及驾驶人。为了实现虚拟模型与真实部件的联系，必须建立实时的仿真开发环境。目前实时仿真在燃料电池电动汽车领域主要用于整车控制器的在环仿真。例如，采用 dSPACE 建立整车控制器的硬件在环仿真环境。而集成真实部件的动力系统实时仿真测试环境，将是整车及动力系统的参数选择与优化设计的技术升级方向。

8. 多能源动力系统的能量管理策略

能量管理策略对燃料经济性影响很大，并且受到动力系统参数和行驶工况的双重影响，目前的开发方式一般是借助仿真技术建立一个虚拟开发环境，对动力系统模型进行合理的简化，从理论分析的角度得到最优功率分配策略与能量源参数和工况特征之间的解析关系，并从该关系出发定量地分析功率缓冲器特性参数对最优功率分配策略的影响，为功率缓冲器的参数选择提供理论依据。开发能量管理策略的最终目的是定量地分析工况特征参数与最优功率分配策略之间的映射关系，完成功率分配策略的工况适应性研究。

完成能量管理策略的工况适应性开发后，其核心问题转变为功率分配优化，当然还必须考虑一些限制条件，如蓄电池容量的限制和各部件额定值的限制等。可用作功率分配的决策输入量很多，如 SOC 值、总线电压、车速、驾驶人功率需求等。按照是否考虑这些变量的历史状态，可以把功率分配策略分为瞬时策略与非瞬时策略两大类。

作为能量管理策略的一部分，制动能量回收是提高燃料经济性的重要措施，也是一个难点问题，必须综合考虑制动稳定性、制动效能、驾驶人感觉、蓄电池充电接受能力等限制条件。制动系统关乎生命安全，而且制动过程通常很短暂，在研究初期一般不直接进行道路试验，而是在建立系统动态模型的基础上再进行深入、细致的仿真研究。

以上是燃料电池电动汽车主要关键技术的介绍，它们对整车的动力性、经济性和安全性影响非常大，是需要解决的核心问题。

7.2 燃料电池电动汽车的基本结构

目前绝大多数燃料电池电动汽车采用的是混合式燃料电池驱动系统，将燃料电池与辅助动力源相结合，燃料电池可以只满足持续功率需求，借助辅助动力源提供加速、爬坡等所需的峰值功率，而且在制动时可以将回馈的能量储存在辅助动力源中。混合式燃料电池电动汽车的驱动系统有串联式和并联式两种，如图 7.4 所示。

燃料电池电动汽车的动力系统由燃料电池系统、辅助动力源、DC/DC 转换器、DC/AC 逆变器和驱动电动机组成。

7.2.1 燃料电池系统

为保证燃料电池组的正常工作，在燃料电池电动汽车所采用的燃料电池系统中，除以燃料电池组为核心外，还装有氢气供给系统、氧气供给系统、气体加湿系统、反应生成物的处理系统、冷却系统和电能转换系统等。只有这些辅助系统匹配恰当和正常运转，才能保证燃料电池系统正常运转。

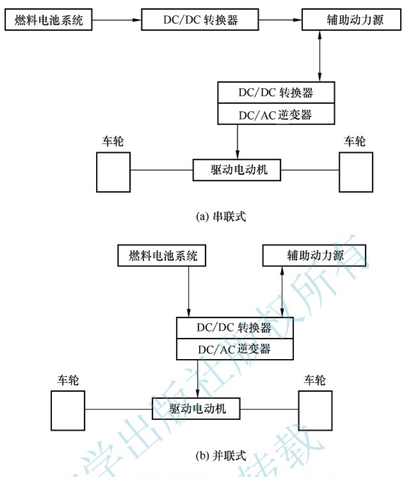


图 7.4 混合式燃料电池电动汽车的驱动系统

1. 以氢为燃料的燃料电池系统

图 7.5 所示是以氢为燃料的燃料电池系统。图 7.6 所示是以氢气为燃料的燃料电池电动汽车的总布置基本结构模型。

(1) **氢气供应、管理和回收系统**。气态氢通常用高压储气瓶来装载，对高压储气瓶的品质要求很高，为保证燃料电池电动汽车一次充气有足够的行驶里程，就需要多个高压储气瓶来储存气态氢。一般轿车需要 2～4 个高压储气瓶，大客车上需要 5～10 个高压储气瓶。

液态氢虽然比能量高于气态氢，但由于液态氢是处于高压状态的，不仅需要用高压储气瓶储存，而且需要用低温保温装置来保持低温，而低温保温装置是一套复杂的系统。

在使用不同压力的氢(高压气态氢和高压低温液态氢)时，需要用不同的氢气储存容器，用不同的减压阀、调压阀、安全阀、压力表、流量表、热量交换器和传感器等来进行控制，并需要对各种管道、阀和仪表等的接头采取严格的防泄漏措施。从燃料电池中排出的水，含有未发生反应的少量的氢气。正常情况下，从燃料电池排出的氢气量应在 1%以下，应用氢气循环泵回收这少量的氢气。

(2) **氧气供应和管理系统**。氧气的来源有从空气中获取氧气或从氧气罐中获取氧气两种方式。空气需要用压缩机来提高压力，以增加燃料电池反应的速度。在燃料电池系统中，配套压缩机的性能有特定的要求，压缩机质量和体积会增加燃料电池系统的质量、体

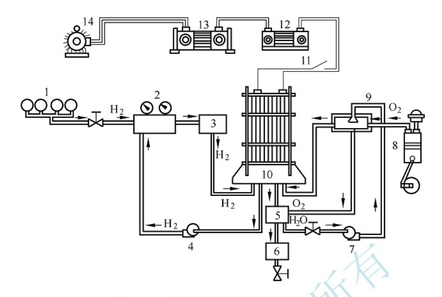


图 7.5 以氢为燃料的燃料电池系统

1—高压储气瓶(氢气储存罐)；2—氢气压力调节仪表；3—热交换器；4—氢气循环泵；
5—冷凝器及气水分离器；6—水箱；7—水泵；8—空气压缩机(或氧气罐)；
9—加湿器及去离子过滤装置；10—燃料电池组；11—电源开关；
12—DC/DC 转换器；13—DC/AC 逆变器；14—驱动电动机

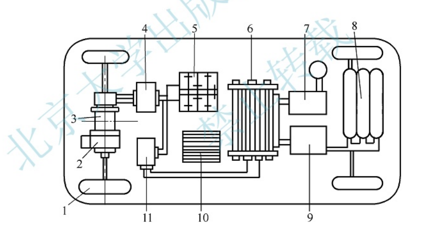


图 7.6 以氢气为燃料的燃料电池电动汽车的总布置基本结构模型

1—驱动轮；2—驱动系统；3—驱动电动机；4—DC/AC 逆变器；5—辅助动力装置
(动力电池组＋飞轮储能器或动力电池组＋超级电容器)；6—燃料电池；
7—空气压缩机及空气供应系统辅助装置；8—氢气储存罐；9—氢气供应
系统辅助装置；10—中央控制器；11—DC/DC 转换器

积和成本，压缩机所消耗的功率会使燃料电池的效率降低。空气供应系统的各种阀、压力表、流量表等的接头要采取防泄漏措施。在空气供应系统中还要对空气进行加湿处理，保证空气有一定的湿度。

(3) **水循环系统**。燃料电池系统中，燃料电池在反应过程中将产生水和热量，在水循环系统中要用冷凝器、气水分离器和水泵等对反应生成的水和热量进行处理，其中一部分水可以用于空气的加湿。另外还需要装置一套冷却系统，以保证燃料电池的正常运转。

(4)**电力管理系统**。燃料电池产生的是直流电，需要经过DC/DC转换器进行调压，在采用交流电动机的驱动系统中，还需要用DC/AC逆变器将直流电转变为三相交流电。

以氢气为燃料的燃料电池系统的各种外围装置的体积和质量，占燃料电池系统总体积和质量的1/3～1/2。

2. 以甲醇为燃料的燃料电池系统

图7.7所示为以甲醇为燃料的燃料电池系统。在以甲醇为燃料的燃料电池系统中，用甲醇供应系统代替了上述的氢气供应系统。该系统包括甲醇储存装置，甲醇供应系统的泵、管道、阀门、加热器，以及控制装置等。

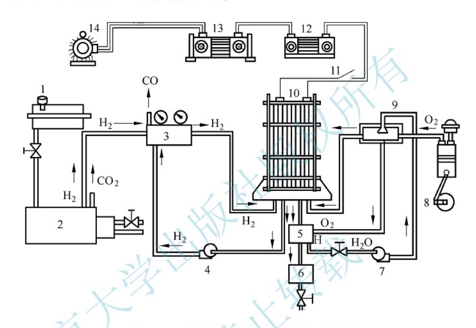


图7.7　以甲醇为燃料的燃料电池系统

1—甲醇储存罐；2—带燃烧器的改质器；3—氢气净化装置；4—氢气循环泵水循环系统；
5—冷凝器及气水分离器；6—水箱；7—水泵；8—空气压缩机(或氧气罐)；
9—加湿器及去离子过滤装置；10—燃料电池；11—电源开关；
12—DC/DC转换器；13—DC/AC逆变器；14—驱动电动机

图7.8所示为以甲醇为燃料的燃料电池电动汽车的总布置基本模型。

(1)**甲醇储存装置**。甲醇可以用普通容器储存，不需要加压或冷藏，可以部分利用内燃机汽车的供应系统，有利于降低燃料电池电动汽车的使用费用。

(2)**燃烧器、加热器和蒸发器**。甲醇进入改质器之前，要用加热器加热甲醇和纯水的混合物，使甲醇和纯水的混合物一起受高温(621℃)的作用，蒸发成甲醇和纯水的混合气，然后进入改质器。

(3)**重整器**。重整器是将甲醇用改质技术转化为氢气的关键设备。不同的碳氢化合物采用不同的重整技术，在重整过程中的温度、压力会有所不同。例如，用水蒸气重整法的温度为621℃；用部分氧化重整法的温度为985℃；用废气重整法的第一阶段温度为985℃，第二阶段温度为250℃。当燃料电池电动汽车用甲醇经过重整产生的氢气作为燃料时，就需要对各种重整方法进行分析，选择最佳重整技术和最适合燃料电池电动汽车配套的重整器。

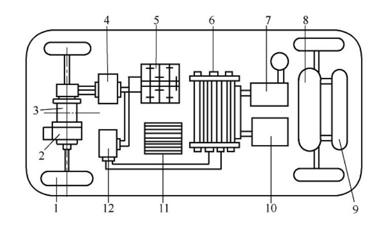


图 7.8 以甲醇为燃料的燃料电池电动汽车的总布置基本模型

1—驱动轮；2—驱动系统；3—驱动电动机；4—DC/AC 逆变器；5—辅助动力装置(动力电池组＋飞轮储能器或动力电池组＋超级电容器)；6—燃料电池；7—空气压缩机及空气供应系统辅助装置；8—重整器；9—甲醇罐；10—氢气供应系统辅助装置；11—中央控制器；12—DC/DC 转换器

(4) **氢气净化器**。改质器所产生的氢气含有少量的 CO，因此必须对氢气进行净化处理。净化器中用催化剂来控制，使氢气中所含的 CO 被氧化为 CO_2 后排出，最终进入燃料电池的氢气中的 CO 的含量不超过规定值的 10^{-5}。

用甲醇改质后所获得的氢气作为燃料时，燃料电池的效率为 40%～42%。以甲醇为燃料的燃料电池系统中的氧气供应、管理系统，反应生成的水和热量的处理系统及电力管理系统，与以氢为燃料的燃料电池系统基本相同。

燃料电池系统的运转一般用计算机进行控制，根据燃料电池电动汽车的运行工况，通过 CAN 总线系统进行信息传递和反馈，并经过计算机的处理，以保证燃料电池正常运行。

7.2.2 辅助动力源

在燃料电池电动汽车上燃料电池系统是主要电源，另外还配备了辅助动力源。燃料电池电动汽车的设计方案不同，其所采用的辅助动力源会有所不同，可以用动力电池组、飞轮储能器或超级电容器等共同组成双电源系统。在具有双电源系统的燃料电池电动汽车上，驱动电动机的电源可以出现以下驱动模式。

(1) 在汽车起动时，由辅助动力源提供电能带动燃料电池系统启动，或带动汽车起步。

(2) 在汽车行驶时，由燃料电池系统提供驱动所需的全部电能，剩余的电能储存到辅助动力源装置中。

(3) 在汽车加速和爬坡时，若燃料电池系统提供的电能不足以满足燃料电池电动汽车驱动功率要求，则由辅助动力源提供额外的电能，使驱动电动机的功率或转矩达到最大，形成燃料电池系统与辅助动力源同时供电的双电源供电模式。

(4) 储存制动时反馈的电能，以及向汽车的各种电子、电器设备提供所需要的电能。

由于燃料电池的比功率和比能量在不断改进和提高，现代燃料电池电动汽车逐步向加大燃料电池系统功率的方向发展，最终实现由燃料电池系统提供驱动所需全部电能。

另外，可采用 42V 蓄电池来储存制动时反馈的电能，并为车载电子电器系统提供电

能。因此，可以取消用于辅助驱动的动力电池组，减轻辅助电池组和整车的质量。

7.2.3 DC/DC 转换器

1. 装置 DC/DC 转换器的必要性

燃料电池电动汽车采用的电源有各自的特性，燃料电池只提供直流电，电压和电流随输出电流的变化而变化。燃料电池不可能接受外电源的充电，电流的方向只是单向流动的。

燃料电池电动汽车采用的辅助电源(蓄电池和超级电容器)在充电和放电时，也是以直流电的形式流动，但电流的方向是可逆的。

燃料电池电动汽车上的各种电源的电压和电流受工况变化的影响呈不稳定状态。为了满足驱动电动机对电压和电流的要求及对多电源电力系统的控制，在电源与驱动电动机之间，用计算机控制实现对多电源的综合控制，保证燃料电池电动汽车的正常运行。燃料电池电动汽车的燃料电池需要装置单向 DC/DC 转换器，蓄电池和超级电容器需要装置双向 DC/DC 转换器。

2. DC/DC 转换器的基本功能

DC/DC 转换器具有以下基本功能。

(1) 当输入直流电压在一定范围内变化时，能输出负载要求变化范围的直流电压。例如，输入电压最低时也能达到最高输出电压，输入电压最高时也能达到最低输出电压等。

(2) 输出负载要求的直流电流(范围)：能够输出足够的直流负载电流，并且在足够宽的负载变化范围(如从空载到满载，即电流从零到最大)设备能正常运行(如电压稳定、不损坏器件)。

3. 燃料电池电动汽车车载 DC/DC 转换器的功能

燃料电池电动汽车中的 DC/DC 转换器的主要功能，概括起来主要包括以下三点。

(1) 调节燃料电池的输出电压。由于燃料电池的输出特性较软，输出电压随负载的变化而变化，轻载时输出电压偏高，重载时输出电压偏低，难以满足驱动电动机控制器的需求，因此借助 DC/DC 转换器对燃料电池的输出电压进行调节。

(2) 调节整车能量分配。燃料电池电动汽车是一种混合动力汽车，配有燃料电池和辅助动力源池，控制燃料电池的输出能量就可以控制整车能量的分配。如果燃料电池的输出能量不足以驱动电动机，缺口能量就由辅助动力源来补充；当燃料电池输出的能量超出驱动电动机的需求时，多余的能量可以存入辅助动力源中，补充辅助动力源的能量。DC/DC 转换器用于控制燃料电池的能量输出。

(3) 稳定整车直流母线电压。燃料电池的输出电压经过 DC/DC 转换器后能稳定整车直流母线电压。

4. 燃料电池电动汽车车载 DC/DC 转换器的要求

DC/DC 转换器在燃料电池电动汽车中起着重要的作用，它的性能必须满足以下要求。

(1) DC/DC 转换器是能量传递部件，因此需要的转换效率要高，以便提高能源的利用率。

(2) 为了降低对燃料电池的输出电压要求，DC/DC 转换器应具有升压功能。



（3）由于燃料电池存在输出不稳定的问题，需要DC/DC转换器闭环运行稳压，为了给驱动器以稳定的输入，需要DC/DC转换器有较好的动态调节能力。

（4）体积小，质量轻。

7.2.4 驱动电动机

燃料电池电动汽车用的驱动电动机主要有直流电动机、交流电动机、永磁电动机和开关磁阻电动机等。

直流电动机驱动系统采用换向器和电刷，保证了励磁磁动势与电枢磁动势的严格正交，易于控制。但直流电动机结构复杂，其高速性能和可靠性受换向器和电刷的影响较大。随着交流调速理论及电力电子器件技术的发展，直流电动机在燃料电池汽车上的应用已逐步减少。

交流电动机坚固耐用、结构简单、技术成熟、免维护、成本低，尤其适合恶劣的工作环境。其缺点是损耗大、效率低、功率因数小，进而导致控制器容量增加，成本上升。美国制造的燃料电池电动汽车较广泛地使用交流异步电动机。例如，通用汽车公司开发的燃料电池电动汽车Sequel采用了60kW的异步电动机。

永磁电动机通常可分为方波供电的无刷直流电动机和正弦波供电的永磁同步电动机。转子采用永磁体，不需要励磁，因此功率因数大，电动机具有较高的功率密度和效率；但受永磁体材料性能的影响，目前仍然存在成本高、可靠性较低及使用寿命较短的缺点。另外，永磁电动机的控制器在电动机发生故障而起保护作用时，由于永磁体的原因电动机会产生与转速成正比的反电动势并通过反向二极管加在高压母线两端，造成潜在的安全问题。与异步电动机相比，永磁电动机的安全性稍差。日本汽车公司较多地采用永磁电动机，如本田推出的燃料电池电动汽车FCX前轮驱动电动机为80kW的永磁电动机。

开关磁阻电动机作为一种基于“磁阻最小原理”设计的新型电动机，定子、转子均采用凸极结构，具有结构简单、可靠性高、控制简便及功率、转矩特性优越的特点；但存在噪声大、转矩和母线电流脉动严重的缺陷，因此在燃料电池电动汽车上应用较少。

燃料电池电动汽车用驱动电动机的选型必须结合整车开发目标，综合考虑电动机的特点。驱动电动机的详细内容见第3章。

7.2.5 动力电控系统

燃料电池电动汽车的动力电控系统，主要由燃料电池管理系统、蓄电池管理系统、动力控制系统及整车控制系统组成，而原型车的变速器系统会简化很多。该系统结构框图如图7.9所示。

1. 燃料电池管理系统

燃料电池管理系统，按整车控制器的功率设定值控制燃料电池系统的功率输出，监测燃料电池系统的工作状态，保证燃料电池系统稳定、可靠地运行时进行故障诊断及管理。

2. 蓄电池管理系统

蓄电池管理系统分上下两级：下级负责蓄电池组电压、温度等物理参数的测量，进行过充电、过放电保护及组内、组间均衡；上级负责蓄电池组的电流检测及SOC值估算，以及相关的故障诊断，同时运行高压漏电保护策略。

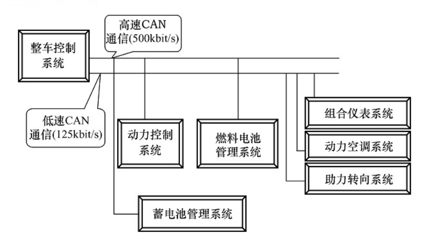


图 7.9　燃料电池电动汽车动力电控系统结构框图

3. 动力控制系统

动力控制系统包括 DC/DC 转换器、DC/AC 逆变器、数据控制语言和空调控制器及空调压缩机变频器，以及电动机冷却系统控制器。DC/DC 转换器和 DC/AC 逆变器的作用如前所述，数据控制语言负责将高压电源转换为系统零部件所需的 12V/24V 低压电源，电动机冷却系统控制器负责电动机及动力控制系统的水冷却系统控制。

4. 整车控制系统

整车控制系统的核心是多能源控制策略(包括制动能量回收功能)。它一方面接收来自驾驶人的需求信息(如点火开关、加速踏板、制动踏板、挡位信息等)实现整车工况控制；另一方面基于反馈的实际工况(如车速、制动、电动机转速)及动力系统的状况(燃料电池及蓄电池的电压、电流等)，根据预先匹配好的多能源控制策略进行能量分配调节控制。当然，整车的故障诊断及管理也由它负责。

上述各系统都通过高速 CAN 总线进行信息交换。在上述基本动力系统架构基础上，可以根据混合度的不同，把燃料电池电动汽车分为电量消耗型和电量维持型。所谓混合度，是指燃料电池额定输出功率与驱动电动机的额定功率之比。电量消耗型的混合度较低，蓄电池是主要的能量源，燃料电池只作为里程延长器来使用；电量维持型的混合度较高，在行驶过程中蓄电池的荷电状态基本保持在一个合理的范围。目前国内外大部分燃料电池电动汽车都采用电量维持型方案。

7.3　燃料电池电动汽车传动系统的参数设计

7.3.1　驱动电动机



【燃料电池电动汽车动力系统匹配】

1. 电动机的选型

受有限的车内空间、恶劣的工作环境及频繁的运行工况切换影响，燃料电池电动汽车用电动机必须具有以下特性：功率密度高，以满足布置要求；瞬时过载能力强，以满足加速和爬坡要求；调速范围

(包括恒转矩区和恒功率区)宽；转矩动态响应快，在运行的整个转矩-转速范围内具有高效率，以提高能量利用率；四象限运行，状态切换平滑；高可靠性及容错控制；成本合理。

燃料电池电动汽车用电动机的选型必须结合整车开发目标，综合考虑电动机驱动系统的特点。具体可参考表7-1所示的电动机驱动系统综合性能评价指标。由表7-1可知，异步电动机及永磁同步电动机得分较高，与全球燃料电池电动汽车电动机驱动系统的发展趋势相一致。按照空间布置及功率需求，通常燃料电池客车较多采用异步电动机驱动系统，而燃料电池轿车较多采用永磁电动机驱动系统。

表7-1 电动机驱动系统综合性能评价指标

综合性能	直流电动机	异步电动机	永磁同步电动机	开关磁阻电动机
功率密度	2	3	5	3
效率	2	3	5	3
成本	4	5	3	4
可靠性	3	5	4	5
控制性	5	4	5	3
技术成熟度	5	5	4	3
安全性	4	5	3	5
总　　计	25	30	29	26

2. 电动机参数的确定

与传统汽车相类似，为保证各种行驶工况需要，满足汽车动力性要求，必须根据汽车动力性指标来研究电动机驱动系统的性能参数，即由最高车速、加速时间和最大爬坡度三个指标来评定。电动机参数主要包括最高转速、最大转矩、最大功率、额定转速、额定功率、额定转矩、工作电压及扩大恒功率区系数。

定义扩大恒功率区系数β为电动机的最高转速n_{max}和额定转速n_e之比，即

$$\beta=\frac{n_{max}}{n_e} \tag{7-1}$$

(1) **最高转速**。电动机的最高转速由最高车速和机械传动系统的传动比来确定。增大电动机的最高转速有利于减小体积、减轻质量；增大最高转速导致传动比增大，从而会加大传动系统的体积、质量和传动损耗。因此应综合考虑各方面因素决定电动机的最高转速，即

$$n_{max}=\frac{30u_{max}i}{3.6\pi r} \tag{7-2}$$

式中，n_{max}为电动机的最高转速；u_{max}为汽车最高车速；i为传动系统的传动比，对于电动汽车来讲，由于电动机转速较高，因此传动比较大，一般传动比为8～15；r为车轮滚动半径。

(2) **最大转矩、最大功率、额定转速**。电动机的最大转矩由最大爬坡度确定，汽车爬坡时车速很低，可忽略空气阻力，则有

$$T_{g\,max}=\frac{r}{\eta i_0}(mgf\cos\alpha_{max}+mg\sin\alpha_{max}) \tag{7-3}$$

式中，$T_{g\,max}$为根据最大爬坡度确定的最大转矩；m 为整车质量；f 为滚动阻力系数；η 为机械传动系统效率；α_{max}为最大爬坡角。

电动机的最大功率取决于加速时间，并与扩大恒功率区系数有关。在最高转速一定，并保证同等加速能力的情况下，电动机的扩大恒功率区系数越大，其最大功率越小，并随着扩大恒功率区系数的增大，最大功率趋于饱和。因此，扩大恒功率区系数的取值，对于降低电动机系统功率需求、减小电动机驱动系统质量与体积、提高整车效率有着非常重要的意义。扩大恒功率区系数的取值取决于电动机驱动系统类型及控制算法，通常取 2～4。

水平路面上，汽车车速从零到目标车速 u_a 的加速时间为

$$t=\int_0^{u_a}=\frac{\delta m}{F_t-F_f-F_w}du \tag{7-4}$$

式中，δ 为旋转质量换算系数；F_t 为汽车行驶驱动力；F_f 为滚动阻力；F_w 为空气阻力。

汽车行驶驱动力与电动机峰值功率、最大转矩之间的关系为

$$F_t=\begin{cases}9550i_0\dfrac{P_{max}\eta}{n_e r}=T_{\alpha\,max}\eta i_0/r & (n\leqslant n_e)\\[2ex]9550i_0\dfrac{P_{max}\eta}{nr} & (n>n_e)\end{cases} \tag{7-5}$$

式中，$T_{\alpha\,max}$为根据峰值功率 P_{max}折算的恒转矩区电动机最大转矩。

当给定汽车加速时间后，可根据式(7－3)和式(7－5)求得电动机峰值功率。

一般峰值功率 P_{max}满足加速性能指标要求，其折算后的最大转矩 $T_{\alpha\,max}$也可以满足汽车爬坡性能指标要求，即 $T_{\alpha\,max}>T_{g\,max}$，因此，电动机最大转矩可设计为 $T_{max}=T_{\alpha\,max}$。如果汽车爬坡度有特殊要求，则取 $T_{max}=T_{g\,max}$，并通过调整最大功率和扩大恒功率区系数重新匹配。

(3) **额定功率和额定转矩**。电动机额定功率主要克服滚动阻力和空气阻力，可由式(7－6)确定。

$$P_e=(F_f+F_w)\frac{u}{3600\eta} \tag{7-6}$$

式中，u 可按汽车最高设计车速的 90％或我国高速公路最高限速 120km/h 取值。

电动机的额定转矩为

$$T_e=9550P_e/n_e \tag{7-7}$$

(4) **工作电压**。工作电压的选择涉及用电安全、元器件的工作条件等问题。工作电压过低，导致电流过大，从而导致系统电阻损耗增大；而工作电压过高，会对逆变器的安全性造成威胁。一般燃料电池汽车工作电压为 280～400V，但目前工作电压的设计有增高的趋势。

7.3.2 传动系统的传动比

传动系统的总传动比是传动系统中各部件传动比的乘积，主要是变速器和主减速器的传动比的乘积。

电动机的机械特性对驱动汽车十分有利，因此，传动系统有多个挡位时，驱动力图与内燃机汽车相比也有其特殊性，所以在选择挡位数和速比、确定最高车速时也与内燃机汽

车不同。下面对可能出现的几种情况进行分析。

(1) 电动机从额定转速向上调速的范围足够大，即 $u_{max}/n_e \geqslant 2.5$ 时，选择一个挡位即可，即采用固定速比。这是一种理想情况。

(2) 电动机从额定转速向上调速的范围不够宽，即电动机最高转速不能满足 $n_{max}/n_e \geqslant 2.5$ 时，应考虑再增加一个挡位。

(3) 电动机从额定转速向上调速的范围较窄，满足 $n_{max}/n_e \leqslant 1.8$，此时增加一个挡位后车速无法衔接起来，可考虑再增加挡位或说明电动机参数与整车性能要求不匹配，应考虑重新选择电动机的参数。

由于燃料电池电动汽车的动力全部由电动机提供，通过控制电动机能够在较大的范围满足车速要求。最大传动比根据电动机的最大转矩和最大爬坡度对应的行驶阻力确定，即

$$i_{max} \geqslant \frac{F_{\alpha\,max} r}{\eta T_{max}} \tag{7-8}$$

式中，$F_{\alpha\,max}$ 为最大爬坡度对应的行驶阻力。

汽车大多数时间是以最高挡行驶的，即用最小传动比的挡位行驶。因此，最小传动比的选择是很重要的，应考虑满足最高车速的要求和行驶在最高车速时的动力性要求。

(1) 由汽车最高车速和电动机的最高转速确定传动系统最小传动比的上限，即

$$i_{min} \leqslant \frac{0.377 n_{max} r}{u_{max}} \tag{7-9}$$

(2) 由电动机最高转速对应的最大输出转矩和汽车最高车速对应的行驶阻力，确定传动系统最小传动比的下限，即

$$i_{min} \geqslant \frac{F_{u\,max} r}{\eta T_{u\,max}} \tag{7-10}$$

式中，$F_{u\,max}$ 为汽车最高车速对应的行驶阻力；$T_{u\,max}$ 为电动机最高转速对应的最大输出转矩。

7.3.3 燃料电池

燃料电池功率的选择，对燃料电池电动汽车动力系统的结构设计非常重要。燃料电池功率偏大，汽车的成本增加；燃料电池功率偏小，在某些大负荷行驶工况(如加速、爬坡等)需要辅助能源提供的动力增加，使得燃料电池数量增加，整车质量、成本上升，系统效率下降，整车布置难度增加，燃料电池均衡控制难度增加等。

燃料电池电动汽车是由燃料电池提供平均行驶功率，在加速、爬坡、高速等大负荷工况下蓄电池输出电能辅助驱动，因而燃料电池功率选择的依据是平均行驶阻力功率。

平均行驶阻力功率是由汽车整车参数和行驶工况来决定的，可用式(7-11)表达。

$$P_{av} = \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{n} P_i t_i \tag{7-11}$$

式中，P_{av} 为平均行驶阻力功率；t_i 为第 i 个功率区间行驶时间；T 为总的行驶时间。

对于燃料电池城市客车，平均行驶阻力功率可以选取中国典型城市循环工况来确定，如图7.10所示。

平均行驶阻力功率可由加速和匀速行驶过程中消耗的能量来计算。

$$P_{av} = \frac{1}{t_a + t_v}\left[\sum_{i=1}^{m}\int_0^{t_{a_i}} F_t u \mathrm{d}t + \sum_{j=1}^{n}\int_0^{t_{v_j}} F_t u \mathrm{d}t\right] \tag{7-12}$$

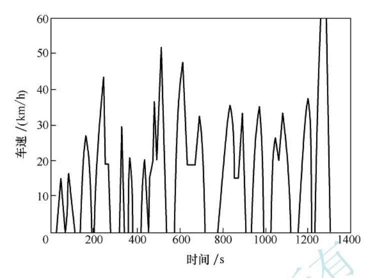


图 7.10 中国典型城市客车循环工况

式中，$t_a=\sum_{i=1}^{m}t_{a_i}$；$t_v=\sum_{j=1}^{n}t_{v_j}$；$t_{a_i}$ 为第 i 个加速行驶时间；t_{v_j} 为第 j 个匀速行驶时间；u 为车速。

实际计算中，燃料电池电动汽车的燃料电池应能单独提供汽车最高车速稳定运行所要求的功率，并留有一定的富余功率对蓄电池充电，所以按汽车的最高车速下的平均行驶阻力功率计算燃料电池的需求功率，即

$$P_{fc}=\frac{1}{\eta_T\eta_m\eta_c}\left(\frac{Gfu_{max}}{3600}+\frac{C_DAu_{max}^3}{76140}\right) \tag{7-13}$$

式中，P_{fc}为汽车最高车速下的平均行驶阻力功率；η_m为电动机驱动系统效率；η_c为 DC/DC 转换器的效率。

燃料电池输出功率大部分转化为驱动能量，剩余部分用于满足辅助系统的功率需求。在纯燃料电池驱动的情况下，输出功率为

$$P_{fc_out}=P_{fc}+P_{fc_par} \tag{7-14}$$

式中，P_{fc_out}为燃料电池的输出功率；P_{fc_par}为辅助系统的功率需求。

在实际运行时，为了保证对电动机的电力供应及对蓄电池进行充电，燃料电池应留有一定的后备功率。

由此可见，燃料电池功率的选择应遵循以下原则。

(1) SOC 值在循环工况前后维持不变，从而确保燃料电池是整个行驶过程中功率消耗的唯一来源，因此燃料电池的功率应大于平均行驶阻力功率。

(2) 燃料电池的最大功率应不高于汽车以最高车速稳定行驶时的需求功率，避免燃料电池单独驱动状态下有过多的富裕功率。

7.3.4 辅助动力源

燃料电池电动汽车的辅助动力源为电池组。在汽车起步的工况下，完全由辅助动力源提供动力；在加速或爬坡等工况时，辅助动力源为主动力源提供能源补充；在汽车制动时，辅助动力源吸收回馈的能量。

1. 辅助动力源类型的选择

辅助动力源用的蓄电池要在整车有较大功率需求时，可以对其进行大电流的放电，待燃料电池响应跟上后放电电流就大幅降低，大电流放电的持续时间不长；在整车进行制动时，又可以在短时间内接受较大电流的充电，即电池要具有瞬间大电流充放电的能力。虽然充放电电流很大，但由于持续时间都较短，因此蓄电池的充电或放电深度都不大，蓄电池的 SOC 值的波动范围也不大。表 7－2 介绍了几种不同类型的辅助动力源用蓄电池的主要性能比较。

表 7－2　几种不同类型的辅助动力源用蓄电池的主要性能比较

电池性能	比能量/(W·h/kg)	比功率/(W/kg)	适用类型	其他描述
铅酸蓄电池	30～45	200～300	辅助动力	现有生产维护设备完善，回收利用率高，但低温性能差
镍镉蓄电池	40～60	150～350	辅助动力	现有生产维护设备完善，但高温性能差，需要有散热系统，回收困难且费用高，对人体有害
金属氢化物镍电池	60～70	150～300	两者皆可	高温时电压变化大，自放电率高，需要有散热系统，制造成本较高
锂离子蓄电池	90～130	250～450	两者皆可	高温时周期寿命下降，低温放电时电压特性软，使用时严禁过充电、过放电，安全性要求很高

从表 7－2 的分析看，蓄电池的选型存在诸多方案，但目前主流是金属氢化物镍电池和锂离子蓄电池。其中，金属氢化物镍电池目前已在电动工具、电动汽车和混合动力汽车中逐步得到应用，如日本丰田汽车公司的混合动力汽车 Prius 采用的就是金属氢化物镍电池。而锂离子蓄电池的诸多优点也引起了很多国家极大的研究兴趣。日本、美国、加拿大、法国、德国等都已经在电动汽车用锂离子蓄电池的开发方面取得了很大进展。

对于燃料电池客车，超级电容器作为辅助动力源是一个新选择。超级电容器是依靠电解质与电极间形成特有的电双层结构和电极表面的氧化还原反应来储存能量的。能量密度是普通电容的 10～100 倍，循环使用寿命是 500000 次。

超级电容器在充放电的整个过程中，没有任何化学反应，并且无高速旋转等机械运动，不存在对环境的污染，也没有任何噪声，结构简单，质量轻，体积小，是一种更加理想的储能器。超级电容器极低的比能量使得它不可能单独用作电动客车的能量源，但作为辅助能量源使用具有显著优点。在汽车起动和爬坡时，超级电容器快速提供大功率电流；在正常行驶时，由主动力源对其快速充电；在制动时，快速储存发电机大电流产生的电能，这可减少电动客车对蓄电池大电流充电的限制，提高电动客车的实用性。

2. 辅助动力源用蓄电池参数的确定

辅助动力源用蓄电池的参数由以下因素确定。

(1) 能回收大部分制动能量。

(2) 在混合驱动模式下，能满足汽车驱动和辅助电器系统的功率需求。

蓄电池的功率需求包括最大放电功率需求和最大充电功率需求。对于燃料电池电动汽

车，蓄电池的首要作用是提供瞬时功率。根据整车的动力性能要求，分析各个工况，如汽车起步、爬坡、超车等的功率需求，除以机械效率，可以得到对动力源的最大功率需求。该功率由蓄电池和燃料电池共同提供。

当汽车长时间匀速行驶时，可以认为此时功率仅由燃料电池提供，由此可以计算出燃料电池的功率，则系统对蓄电池的放电功率需求为总功率需求减去燃料电池的功率。

另外，汽车在紧急制动时产生的制动功率很大，但以此功率来设计蓄电池的最大充电功率是不合理的。实际上，制动能量回收效益最明显的是在城市循环工况下，可以根据城市循环工况的统计特性来选择最大充电功率。

根据上述分析，蓄电池的额定功率可由式(7-15)确定。

$$P_{bat_rat}=\frac{P_{max}}{\eta_m}+P_{aux}-P_{fc_out}+P_{fc_par} \tag{7-15}$$

式中，P_{bat_rat}为蓄电池的额定功率；P_{aux}为汽车辅助电器系统的功率需求。

蓄电池的质量为

$$m_{bat}=\frac{P_{bat_rat}}{\rho_{bat_pow}} \tag{7-16}$$

式中，m_{bat}为蓄电池的质量；ρ_{bat_pow}为蓄电池的比功率。

蓄电池的额定容量为

$$Q_{bat}=\frac{m_{bat}\rho_{bat_en}}{U_{bat_rat}\eta_{bat_dis}} \tag{7-17}$$

式中，Q_{bat}为蓄电池的额定容量；ρ_{bat_en}为蓄电池的比能量；U_{bat_rat}为蓄电池的额定电压；η_{bat_dis}为蓄电池的放电效率。

7.4 燃料电池电动汽车的能量控制策略

燃料电池电动汽车动力系统的能量控制策略随着动力系统的结构形式不同而有所不同，但总的能量控制策略有三大基本控制目标，即汽车动力性、汽车经济性和汽车续驶里程。

在燃料电池系统与动力电池混合动力汽车的行驶过程中，动力系统控制器需要时刻根据汽车的功率需求及电池管理系统所提供的动力电池 SOC 值，来决定能量在燃料电池系统和动力电池中的分配。也就是需要根据加速踏板、制动踏板及挡位信息等计算出需求转矩和需求功率，然后进行最优化的能量分配，将燃料电池系统和动力电池的输出经电机控制器，转化为驱动电动机的功率输出，从而驱动汽车行驶。

燃料电池混合动力系统的控制策略主要有 On/Off 控制策略、功率跟随控制策略、瞬时优化最佳能耗控制策略等。

7.4.1 On/Off 控制策略

On/Off 控制策略的核心是汽车在行驶过程中，燃料电池系统始终工作在其高效区，从而保证汽车有较大的续驶里程。为了满足这一既定目标，需要对动力电池的 SOC 值进行设定。假定燃料电池混合动力电动汽车在行驶过程中，其动力电池荷电状态的最大值为

SOC_{max}，最小值为 SOC_{min}，动力电池的 SOC 值在最大值与最小值之间时，其等效内阻相对较小，因此在这一区间工作时，动力电池的效率比较高。

On/Off 控制策略的执行情况如下。

（1）当 $SOC \leqslant SOC_{min}$时，动力电池处于低荷电状态，燃料电池系统需要开启并持续工作在高效区，为驱动电动机提供主动力源。当驱动电动机的需求功率 P_m 小于此时燃料电池系统的输出功率 P_{ro} 时，电力控制系统需要将燃料电池系统多余的功率提供给动力电池充电，直至动力电池的 $SOC > SOC_{max}$或者 $P_{ro} < P_m$ 。

（2）当 $SOC_{min} < SOC \leqslant SOC_{max}$时，动力电池荷电状态适宜，此时动力电池能够提供的最大功率为 P_{xm} 。当 $P_{xm} \geqslant P_m$ 时，动力电池作为主动力源，燃料电池系统处于关闭状态；当 $P_{xm} < P_m$ 时，动力电池的最大功率已不能满足汽车的行驶需求，此时，燃料电池系统开启，以弥补驱动功率的不足。

（3）当 $SOC > SOC_{max}$时，动力电池处于高荷电状态，动力电池能够满足驱动电动机需求功率的前提下，燃料电池系统关闭，动力电池单独提供驱动电动机的功率需求，直至动力电池的 $SOC < SOC_{min}$或者 $P_{xm} < P_m$ 。

7.4.2 功率跟随控制策略

功率跟随控制策略以动力电池的荷电状态为核心，即保持动力电池始终工作在最佳的 SOC 范围内，燃料电池系统除了供给驱动电动机一部分功率以外，还需要额外承担一部分动力电池的功率消耗。燃料电池系统的开启与关闭不是简单地以动力电池的 SOC 上下限阈值为参考，而是由驱动电动机功率需求及电池 SOC 值共同控制的。因此，功率跟随控制策略可以在一定程度上解决 On/Off 控制策略不能满足燃料电池电动汽车行驶的动力性要求及同时改善燃料电池系统和动力电池系统，使主动力源与辅助动力源尽可能起到最优控制。

功率跟随控制策略的执行情况如下。

（1）当汽车停止时，燃料电池系统和动力电池均不向驱动电动机输出功率。

（2）当汽车起动时，燃料电池系统关闭，动力电池单独工作，向驱动电动机输出起动功率 P_m ，动力电池的输出功率 $P_{xm} = P_m$ ，当燃料电池系统经预热后达到启动温度之后，再根据功率需求决定燃料电池系统是否启动，即当驱动电动机功率需求 $P_{req} < P_{xm}$ 时，动力电池仍旧单独向驱动电动机输出功率，直至 $P_{req} \geqslant P_{xm}$ 时为止。

（3）当汽车处于怠速状态时，系统需求功率 $P_{req} = 0$，燃料电池系统和动力电池均不向驱动电动机输出功率，但此时燃料电池系统需要根据动力电池的 SOC 值来判断是否向动力电池充电。通常设定动力电池的目标荷电状态为 $SOC_{aim} = (SOC_{min} + SOC_{max})/2$，控制系统根据当前动力电池 SOC 与 SOC_{aim}之间的关系决定燃料电池系统的输出功率，即

$$P_{ro} = \frac{2(SOC_{aim} - SOC)}{SOC_{max} - SOC_{min}} \times P_{ch} \tag{7-18}$$

式中，P_{ch} 为 $SOC = SOC_{min}$时控制系统的额外功率。当 $SOC < SOC_{aim}$时，燃料电池系统向动力电池充电，反之则不向动力电池输出功率。

（4）当汽车正常行驶时，需要根据当前驱动电动机的需求功率与燃料电池系统所能提供的功率进行判断。

① 当 $P_{req} > P_{ro_max}$ 时，如汽车加速或者上坡时，燃料电池系统的输出的最大功率小于

驱动电动机的需求功率，此时动力电池也需要开启向驱动电动机输出功率，燃料电池系统输出额定功率，动力电池的输出功率为需求功率与燃料电池额定功率的差值，即

$$P_{xm} = P_{req} - P_{ro} \tag{7-19}$$

② 当 $P_{ro_min} < P_{req} \leqslant P_{ro_max}$ 时，燃料电池系统的输出功率除了满足驱动电动机的功率需求之外，还需要根据动力电池的 SOC 值来决定是否向动力电池输出功率。此时燃料电池系统的输出功率为

$$P_{ro} = \frac{2(SOC_{aim} - SOC)}{SOC_{max} - SOC_{min}} \times P_{ch} + P_{m} \tag{7-20}$$

当动力电池 $SOC \geqslant SOC_{aim}$时，燃料电池系统无需向动力电池充电，此时驱动电动机的需求功率可由燃料电池系统和动力电池同时提供；当动力电池 $SOC < SOC_{aim}$时，燃料电池系统同时为驱动电动机和动力电池输出功率。当驱动电动机的需求功率和动力电池的充电功率之和小于燃料电池系统的最小输出功率 P_{ro_min} 时，为避免燃料电池系统在低效率区工作，燃料电池系统以 P_{ro_min} 工作。

③ 当 $P_{req} \leqslant P_{ro_min}$ 时，驱动电动机的需求功率较小。若动力电池 $SOC < SOC_{aim}$，则燃料电池系统工作在高效区，同时为驱动电动机和动力电池输出功率，直至 $SOC \geqslant SOC_{max}$时为止；若动力电池荷电状态已处于 SOC_{max}，并且能满足驱动电动机功率需求，则动力电池单独为系统提供功率输出，直至 $SOC < SOC_{min}$，同时，为了避免燃料电池系统频繁启停影响燃料电池系统寿命，需要根据当前动力电池的 SOC 值来做适当的规定。

(5) 汽车处于制动状态时，$P_{m} < 0$，燃料电池系统与动力电池均不向驱动电动机输出功率，可根据当前动力电池的 SOC 值来对制动能量进行回收，给动力电池充电，同时燃料电池系统也需要根据当前动力电池的 SOC 值决定是否向动力电池充电。

与 On/Off 控制策略相比，功率跟随控制策略不是单纯的以动力电池的 SOC 值来决定燃料电池系统的开启与关闭，而是将燃料电池系统的合适工作区间（P_{ro_min}，P_{ro_max}）与动力电池的 SOC_{aim} 相结合，以驱动电动机的功率需求为依据，综合考虑来实现系统的功率分配。在这一过程中，功率跟随控制策略可以避免 On/Off 控制策略中燃料电池系统频繁启停和动力电池频繁深度充放电的影响，从而在一定程度上延长燃料电池电动汽车的寿命，实现系统能量分配的优化。

7.4.3 瞬时优化最佳能耗控制策略

瞬时优化最佳能耗控制策略的核心是建立动力系统燃料消耗等价函数，根据等价函数来确定一个周期内驱动电动机的需求功率如何在燃料电池和动力电池之间分配，从而使动力系统瞬时燃料消耗量最小。

瞬时优化最佳能耗控制策略以功率跟随控制策略为基础，其核心是在每个控制周期内对系统的能量分配进行瞬时优化，即决定驱动电动机的需求功率如何在燃料电池系统和动力电池之间分配，尽可能地提高汽车的经济性。

当燃料电池电动汽车工作时，控制系统需要根据当前时刻动力电池的 SOC 值，来确定下一时刻燃料电池系统是否向动力电池充电。等价氢气消耗函数建立的理论基础是，在当前时刻，动力电池处于放电状态时，燃料电池系统和动力电池同时向驱动电动机输出功率，为了保证动力电池荷电状态在 SOC_{aim}附近，需要在未来向动力电池充电；与之相反，在当前时刻，动力电池处于充电状态时，燃料电池系统向动力电池和驱动电动机同时输出

功率，动力电池需要在未来时刻放电从而使荷电状态回到 SOC_{aim}附近。

瞬时优化最佳能耗控制策略是在保证整车动力性能的前提下，结合燃料消耗等价函数，在每个周期内决定驱动电动机的需求功率如何在燃料电池系统和动力电池中分配，从而实现经济性能的改善。其具体控制策略规则如下。

（1）停车及怠速阶段。根据动力电池的 SOC 值来判断燃料电池系统是否需要向动力电池充电。

（2）起动阶段。动力电池向燃料电池系统输出功率，直至达到燃料电池暖机起动温度，再根据驱动电动机的需求功率决定燃料电池系统是否输出功率。

（3）正常行驶阶段。此阶段可分为四种情况：①动力电池输出功率，燃料电池以小功率输出；②燃料电池系统和动力电池混合驱动，功率分配比根据瞬时优化函数决定；③燃料电池系统输出功率满足驱动电动机功率需求，同时给动力电池充电；④燃料电池系统单独工作，动力电池处于较稳定的荷电状态，燃料电池系统处于最佳工况点。

（4）制动阶段。动力电池和燃料电池系统均不向驱动电动机输出功率，此时可根据当前动力电池的 SOC 值对驱动电动机的制动能量进行回收。

三种能量控制策略比较见表 7－3。

表 7－3　三种能量控制策略比较

控制策略	控制目标	优点	缺点
On/Off 控制策略	燃料电池系统处于最高效率点功率	燃料电池系统工作在高效区，经济性好，控制方法简单	没有考虑动力电池的工作状态，容易导致过充电、过放电；系统动力性不能得到保障
功率跟随控制策略	动力电池荷电状态在 SOC_{aim} 附近	动力电池处于浅循环工作状态，对电池寿命损耗较小，而且系统动力性较好	燃料电池系统要在一个范围内时时改变，对燃料电池系统的要求较高，增加了系统控制的难度
瞬时优化最佳能耗控制策略	等效氢气消耗函数	经济性和动力性俱佳	控制策略比较复杂，对控制系统要求较高

除此之外，学者们在功率跟随控制策略的基础之上，根据不同的燃料电池电动汽车，结合模糊控制、遗传算法、神经网络算法等先进算法，提出了许多新的控制策略，读者可自行学习，这里不做介绍。



1. 燃料电池电动汽车有哪些类型？其特点是什么？
2. 燃料电池电动汽车由哪几部分组成？其作用是什么？
3. 在燃料电池电动汽车设计中，如何确定燃料电池、驱动电动机和蓄电池参数？

参 考 文 献

安平，其鲁，2006. 锂离子二次电池的应用和发展 [J]. 北京大学学报(自然科学版)，42(增刊)：1-7.

毕明，2007. 直流电动机驱动控制器硬件的设计与实现 [D]. 成都：电子科技大学.

曹秉刚，曹建波，李军伟，等，2008. 超级电容在电动车中的应用研究 [J]. 西安交通大学学报，42(11)：1317-1322.

陈家昌，王菊，伦景光，2008. 国际燃料电池汽车技术研发动态和发展趋势 [J]. 汽车工程，30(5)：380-385.

陈全世，信继欣，孙力，2005. 中国电动车辆研究与开发 [M]. 北京：北京理工大学出版社.

程伟，欧阳启，张晓辉，2008. 燃料电池汽车用电机驱动系统选型及性能参数研究 [J]. 上海汽车(3)：4-7.

崔胜民，2016. 新能源汽车技术解析 [M]. 北京：化学工业出版社.

崔智全，2004. 混合动力电动汽车动力源功率分配研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学.

电气学会，电动汽车驱动系统调查专门委员会，2008. 电动汽车最新技术 [M]. 康龙云，译. 北京：机械工业出版社.

董昭，2007. 无刷直流电动机控制系统的研究 [D]. 西安：西安理工大学.

段炼，2008. 直接甲醇燃料电池阳极气液两相流动的研究 [D]. 济南：山东大学.

冯垛生，2007. 太阳能发电原理与应用 [M]. 北京：人民邮电出版社.

高瑞，2007. 基于卡尔曼滤波的永磁同步电机的无位置传感器算法研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学.

郭瑞敏，2007. 铝/空气电池钙钛矿型空气电极的研究 [D]. 长沙：中南大学.

郝亚川，2008. 基于永磁同步电机的电动汽车驱动系统研究 [D]. 北京：北京工业大学.

胡骅，宋慧，2007a. 燃料电池电动汽车(Ⅰ) [J]. 汽车电器(1)：51-55.

胡骅，宋慧，2007b. 燃料电池电动汽车(Ⅱ) [J]. 汽车电器(2)：49-55.

胡骅，宋慧，2007c. 燃料电池电动汽车(Ⅲ) [J]. 汽车电器(3)：46-54.

胡骅，宋慧，2007d. 燃料电池电动汽车(续完) [J]. 汽车电器(4)：51-59.

黄学杰，2008. 浅谈混合电动汽车用锂离子电池 [J]. 电池工业，13(3)：187-190.

姜辉，2006. 电动汽车传动系统的匹配及优化 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学.

李建兴，2005. 铅酸蓄电池电动汽车续驶里程的研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学.

李时伟，2007. 开关磁阻电动机参数分析及控制系统研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学.

刘博，2004. 基于纯电动汽车的制动能量回收系统的研究与实现 [D]. 北京：清华大学.

刘灵芝，2008. 锂离子电池管理系统研究 [J]. 安庆师范学院学报(自然科学版)，14(2)：50-52，78.

卢圣涛，2007. 车用交流异步电机直接转矩控制系统研究与仿真 [D]. 武汉：武汉理工大学.

马爱华，2008. 锂离子电池智能管理系统设计 [D]. 北京：北京交通大学.

秦岭，2007. 基于无刷直流电机的电动汽车驱动控制器的研制 [D]. 合肥：合肥工业大学.

秦韵，2012. 增程式电动汽车动力传动系统参数匹配及性能仿真[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学.

曲荣利，2007. 混合动力汽车镍氢电池充放电特性研究 [D]. 大连：大连理工大学.

任东华，2007. 质子交换膜燃料电池性能影响研究 [D]. 南京：南京理工大学.

芮菊，2008. 固体氧化物燃料电池(SOFC)的建模与仿真 [D]. 上海：上海交通大学.

石小波，2008. 电动车用开关磁阻电机低转矩脉动控制系统研究及实现 [D]. 长沙：湖南大学.

双纪文，2008. 混合动力汽车的无位置传感器无刷直流电机控制系统研究［D］. 成都：西南交通大学.

孙逢春，张承宁，祝嘉光，1997. 电动汽车［M］. 北京：北京理工大学出版社.

孙刚，2006. 混合动力车辆制动能量回收系统的控制研究［D］. 哈尔滨：哈尔滨工业大学.

孙振川，2008. 异步电机直接转矩控制理论和技术的研究［D］. 济南：山东大学.

覃宇夏，2008. 锂离子电池大电流放电影响因素的研究［D］. 长沙：湖南大学.

田锐，2005. 混合动力汽车用铅酸蓄电池均衡控制策略研究［D］. 重庆：重庆大学.

田玉冬，吴军民，2007. 熔融碳酸盐燃料电池的电气建模［J］. 上海电机学院学报，10(4)：254-257.

王成，2007. 电动汽车发展对能源与环境影响研究［D］. 长春：吉林大学.

王凤麒，2005. 并联式混合动力汽车动力传动系的研究［D］. 哈尔滨：哈尔滨工业大学.

王宏亮，2005. 纯电动汽车整车建模与仿真［D］. 哈尔滨：哈尔滨工业大学.

王辉，2006. 锌空气电池空气电极的研究［D］. 哈尔滨：哈尔滨工业大学.

王家捷，穆举国，茹海涛，2006. 锌镍动力电池的发展和应用［J］. 电池工业，11(3)：194-196.

王秀玲，2007. 电动汽车驱动系统的研究［D］. 长春：吉林大学.

王益全，2005. 电动机原理与实用技术［M］. 北京：科学出版社.

王源，2006. 电动汽车用动力铅酸电池快速充电技术研究［D］. 哈尔滨：哈尔滨工业大学.

王远，2006. 太阳能电池及其应用技术研究［D］. 武汉：华中科技大学.

王振，2007. 质子交换膜燃料电池系统特性仿真研究［D］. 济南：山东大学.

王治华，殷承良，2008. 电动汽车用 $LiFePO_4$ 锂离子电池安全性分析［J］. 电池工业，13(3)：169-172.

魏学哲，戴海峰，孙泽昌，2007. 燃料电池汽车辅助动力蓄电池选型设计［J］. 电源技术，31(10)：772-776.

温有东，2012. 电动汽车用永磁同步电机的研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学.

翁史烈，翁一武，苏明，2003. 熔融碳酸盐燃料电池动态特性的研究［J］. 中国电机工程学报，23(7)：168-172，200.

夏青松，2007. 电动汽车动力系统设计及仿真研究［D］. 武汉：武汉理工大学.

肖婷，2008. 车用动力镍氢电池 SOC 建模与仿真［D］. 武汉：武汉理工大学.

熊家祚，2007. 直接内重整熔融碳酸盐燃料电池的建模与控制［D］. 郑州：郑州大学.

熊伟铭，张觉慧，任纪良，等，2007. 燃料电池汽车整车集成的关键技术［J］. 上海汽车(8)：3-6，13.

徐文兵，2008. 超级电容能量监控系统的研究与设计［D］. 上海：上海交通大学.

杨妙梁，2008a. 国外车用锂离子蓄电池的应用与发展动向(一)［J］. 汽车与配件，39(3)：30-33.

杨妙梁，2008b. 国外车用锂离子蓄电池的应用与发展动向(二)［J］. 汽车与配件，52(4)：46-48.

杨武，2004. 车用燃料电池动力系统的仿真研究［D］. 北京：清华大学.

姚海兰，2008. 永磁同步电机直接转矩控制系统［D］. 上海：同济大学.

叶开志，吴志新，郑广州，等，2008. 固体氧化物燃料电池在电动汽车中的应用［J］. 城市车辆(6)：42-44.

尹安东，于霞，2007. 燃料电池电动汽车驱动系统及其控制技术［J］. 农业装备与车辆工程(4)：33-35.

于霞，2008. 燃料电池电动客车参数匹配与性能仿真研究［D］. 合肥：合肥工业大学.

曾成碧，赵莉华，2009. 电机学［M］. 北京：机械工业出版社.

翟跃，2010. 电动汽车网络管理系统的研究与实现[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学.

张宏阁，马建军，2008. 铁电池技术在电动汽车上的应用分析［J］. 装备制造技术(1)：99-100.



张金柱，2005. 永磁同步电动机在混合动力汽车上的应用 [J]. 上海汽车(6)：32-34，40.
张鹏，2010. 电动汽车制动能量回收系统的研究与实现[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学.
张巍，2008. 纯电动汽车电池管理系统的研究 [D]. 北京：北京交通大学.
张武荣，2007. 异步电机矢量控制研究 [D]. 沈阳：沈阳工业大学.
张玉龙，2007. 镍氢动力电池智能管理系统的研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学.
赵云峰，陈俊，朱自萍，等，2012. 混合动力汽车和新能源汽车数据分析[J]. 农业装备与车辆工程，50(5)：26-33 .
郑敏信，齐铂金，吴红杰，2008. 锂离子动力电池组充放电动态特性建模 [J]. 电池，38(3)：149-151.
周立平，2005. 基于模糊的并联混合动力电动汽车能量管理策略 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学.
朱可，2007. 燃料电池城市客车动力系统关键技术研究 [D]. 合肥：合肥工业大学.
Ehsani M，Gao Y，Gay S E，et al，2008. 现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车——基本原理、理论和设计 [M]. 倪光正，倪培宏，熊素铭，译. 北京：机械工业出版社.
Global Insight，2008. 车用锂离子蓄电池的发展前景 [J]. 汽车与配件，42(10)：48-51.